

UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Eléctrica



**“Análisis y modelado de baterías de Ion Litio para
vehículos eléctricos”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de
Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Franklin Medardo Pillco Valladolid
CI: 0104545322

DIRECTOR:

Luis Gerardo González Morales PhD.
CI: 1729711059

Cuenca – Ecuador
2018

RESUMEN

El presente estudio analiza los modelos eléctricos existentes e identifica aquel que mejor reproduce el comportamiento real de los acumuladores de Ion Litio para vehículos eléctricos. En este documento se presenta un estudio bibliográfico sobre las tipologías y los antecedentes de los vehículos eléctricos. Se revisan las tecnologías y la tendencia actual de los sistemas de almacenamiento electroquímico que se aplican en los acumuladores de los vehículos eléctricos. Se analizan las características principales de los acumuladores de Ion Litio, su funcionamiento, procesos internos y los principales factores que degradan este tipo de acumulador. Se revisan los procesos parametrización de los circuitos equivalentes que reproducen el comportamiento del acumulador desde un enfoque eléctrico.

El enfoque de estudio abarca los diferentes circuitos equivalentes que reproducen el comportamiento del acumulador, sus principales características y su parametrización, para posteriormente realizar la aplicación de un modelo que caracterice el comportamiento de un módulo acumulador del vehículo eléctrico Kia Soul, de propiedad de la Universidad de Cuenca, y cinco modelos de circuitos equivalentes para dos celdas acumuladoras, las cuales tienen aplicaciones en la tracción eléctrica. Se realiza una caracterización de las celdas modeladas para los requerimientos energéticos del vehículo Kia Soul y además se hace la validación de los módulos planteados con las celdas modeladas al realizar una comparación con el modelo del banco acumulador del vehículo.

Finalmente se realiza un análisis de los resultados de los modelos con respecto a los datos experimentales, de los cuales se muestran diferentes niveles de exactitud.

PALABRAS CLAVE

Vehículo Eléctrico, Acumulador de Energía Eléctrica, Modelos de Baterías, Energía Específica, Densidad de Energía, Potencia Específica, Ciclos de Vida.

ABSTRACT

The present study analyzes the existing electrical models and identifies the one that best represents the actual behavior of Lithium Ion accumulators for electric vehicles. This document presents a bibliographical study on the typologies and background of electric vehicles. The technologies and the current trend of the electrochemical storage systems that are applied in the accumulators of electric vehicles are reviewed. The main characteristics of lithium ion batteries, their operation, internal processes and the main factors that degrade this type of accumulator are analyzed. The parametrization processes of the equivalent circuits that reproduce the behavior of the accumulator from an electric approach are reviewed.

The study approach include the different equivalent circuits that reproduce the behavior of the accumulator, its main characteristics and its parameterization, to subsequently make the application of a model that characterizes the behavior of an accumulator module of the Kia Soul electric vehicle, owned by the University of Cuenca, and five models of equivalent circuits for two accumulator cells, which have applications in the electric traction. A characterization of the modeled cells for the energy requirements of the Kia Soul vehicle is carried out and also the validation of the modules proposed with the modeled cells is made when making a comparison with the model of the vehicle accumulator bank.

Finally, an analysis of the results of the models is made with respect to the experimental data, of which different levels of accuracy are shown.

KEY WORDS

Vehicle Electric, Storage Electric Power, Battery Models, Specific Energy, Energy Density, Specific Power, Life Cycles.

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN, VEHÍCULO ELÉCTRICO Y SUS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO	13
1.1 INTRODUCCIÓN	13
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.3 OBJETIVOS.....	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4 VEHÍCULO ELÉCTRICO.....	15
1.4.1 Tipos de Vehículos Eléctricos.....	16
1.4.1.1 Vehículos Eléctricos de Batería (VEB).....	17
1.4.1.2 Vehículo Híbrido (VEH).....	17
1.4.1.2.1 Vehículo Eléctrico Híbrido Serie (VEHS).....	18
1.4.1.2.2 Vehículo Eléctrico Híbrido Paralelo (VEHP).....	18
1.4.1.3 Vehículos Eléctricos con Celdas Combustible de Hidrógeno (VECH)	19
1.5 BATERÍA ELECTROQUÍMICA.....	19
1.5.1 Aplicaciones de las Baterías Secundarias (Recargables)	20
1.5.2 Desarrollo de las Tecnologías de Acumuladores	21
1.5.3 Baterías con Mayor Aplicación en Vehículos de Tracción Eléctrica	24
1.5.3.1 Baterías de Plomo Ácido en (VEB).....	24
1.5.3.2 Baterías de Níquel Hidruro Metálico en (VEH)	25
1.5.3.3 Baterías de Ion Litio en (VEB) y (VEH).....	25
CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES ACERCA DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO A MODELAR “ACUMULADORES DE ION LITIO”	28
2.1 TIPOS DE BATERÍAS DE ION LITIO	28
2.1.1 Tipos de baterías de Ion Litio por su Forma de Diseño	28



2.1.2	Tipos de baterías de Ion Litio por su Química	31
2.2	DEGRADACIÓN DE LOS ACUMULADORES DE ION LITIO	34
2.3	PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO	35
2.4	POLARIZACIÓN EN LAS CELDAS ION LITIO	36
2.5	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL COMPORTAMIENTO DE UN ACUMULADOR DE ENERGÍA	38
CAPÍTULO 3: CAMPOS DE ANÁLISIS DE LOS ACUMULADORES DE ION LITIO Y PROCEDIMIENTOS DEL MODELADO EN EL CAMPO ELÉCTRICO		41
3.1	DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS.....	41
3.2	MODELOS DEL CAMPO ELÉCTRICO	42
3.3	MODELOS DEL CAMPO QUÍMICO.....	42
3.4	MODELOS MATEMÁTICOS	42
3.5	ANÁLISIS DE LOS PROCEDIMIENTOS DEL MODELADO EN EL CAMPO ELÉCTRICO	43
3.5.1	Técnicas de modelado en el dominio del tiempo	44
3.5.1.1	Potencia Constante.....	44
3.5.1.2	Interrupción de Corriente	44
3.5.1.3	Voltamperometría Cíclica.....	47
3.5.2	Técnicas de modelado en el dominio de la frecuencia	48
3.5.2.1	Análisis de Frecuencia en Estado Estacionario	48
3.5.2.2	Espectroscopía de la Impedancia Electroquímica (EIS)	49
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE ACUMULADORES DE ION LITIO DESDE EL PUNTO DE VISTA ELÉCTRICO		53
4.1	MODELO EQUIVALENTE DE RESISTENCIA INTERNA (R _{INT}).....	53
4.2	MODELO EQUIVALENTE DE THÉVENIN.....	54
4.3	MODELO PNGV.....	58
4.4	MODELO DE POLARIZACIÓN DUAL	59
4.5	MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE PROPUESTO POR CHEN 2006	62
4.6	MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE PROPUESTO POR S.P CASTAÑO SOLÍS 2014.....	66



4.7	MODELADO DE BATERÍAS A PARTIR DE CELDAS PROPUESTO POR KIM 2013.....	73
-----	---	----

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS, MODELADO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL CON LOS MODELOS DE CIRCUITOS EQUIVALENTES 75

5.1	CONSIDERACIONES DEL MODELO A SELECCIONAR.....	75
5.2	CÁLCULO DEL ESTADO DE CARGA SoC.....	76
5.3	MODELADO DEL PACK ACUMULADOR DEL VE KIA SOUL.....	76
5.3.1	Proceso Experimental.....	77
5.3.2	Selección del Modelo de Circuito Equivalente	80
5.3.3	Obtención de los Parámetros del Modelo	80
5.3.4	Planteamiento del Modelo para el software Simulink	85
5.3.4.1	Componentes del Modelo Propuesto en Simulink	86
5.3.4.1.1	Subsistema para el cálculo de SoC.....	86
5.3.4.1.2	Subsistema para el Cálculo de VOC y RS	86
5.3.4.1.3	Subsistema para el Cálculo de VRS	87
5.3.4.1.4	Subsistema M_BATERÍA	88
5.3.5	Validación del Modelo.....	89
5.4	MODELADO DE CELDAS ACUMULADORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA	92
5.4.1	Descripción de las Celdas Acumuladoras a Modelar.....	92
5.4.2	Planteamiento de los Modelos en Simulink	95
5.4.2.1	Planteamiento de los Modelos de Thévenin y Chen	95
5.4.2.1.1	Subsistemas de cálculo RTC, RTL, CTC y CTL.....	96
5.4.2.1.2	Subsistema para el Cálculo de VRC – T. Corto y VRC – T. Largo	96
5.4.2.2	Planteamiento del Modelo PNGV	96
5.4.2.2.1	Subsistema para el Cálculo de C_Serie.....	96
5.4.2.2.2	Subsistema para el Cálculo de VC – Serie	97
5.4.2.3	Planteamiento del Modelo S.C Modificado	97
5.4.2.4	Planteamiento del Modelo de una Banco a partir de Celdas Considerando la Propuesta de Kim 2013	97



5.4.2.5	Subsistema denominado M_CELDA y BATERÍA	100
5.4.3	Proceso experimental para la determinación de los Circuitos Equivalentes de los Acumuladores por la técnica de Interrupción de Corriente	102
5.4.3.1	Descripción del Procedimiento Experimental.....	102
5.4.3.2	Montaje de los equipos para el proceso experimental	104
5.4.4	Análisis de Resultados	105
5.4.4.1	Cálculo de los Parámetros de los Circuitos Equivalentes	105
5.4.5	Parametrización de la Celda Samsung SDI de 68Ah	107
5.4.5.1	Validación del modelo para la celda Samsung de 68Ah	114
5.4.6	Parametrización de la Celda A123 modelo AMP20M1HD-A	119
5.4.6.1	Validación del modelo para la celda A123 modelo AMP20M1HD-A.....	125
5.5	COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE CIRCUITOS EQUIVALENTES	128
5.6	CARACTERIZACIÓN DE LAS CELDAS COMO BANCOS ACUMULADORES DEL VE KIA SOUL ...	128
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		133
6.1	CONCLUSIONES	133
6.1.1	Tecnologías de Acumuladores de Energía Eléctrica	133
6.1.2	Modelado del Banco Acumulador del Vehículo Eléctrico Kia Soul	133
6.1.3	Proceso Experimental y Proceso de Parametrización de las Celdas	133
6.1.4	Modelos de Circuitos Equivalentes para las Celdas	134
6.1.5	Proceso de Caracterización de las Celdas como Bancos Acumuladores del VE Kia Soul	134
6.1.6	Conclusiones Generales del Trabajo.....	135
6.2	RECOMENDACIONES.....	135
BIBLIOGRAFÍA.....		137



Universidad de Cuenca
Cláusula Propiedad Intelectual

Yo, Franklin Medardo Pillco Valladolid, autor del trabajo de titulación “ANÁLISIS Y MODELADO DE BATERÍAS DE ION LITIO PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, marzo de 2018.



Franklin Medardo Pillco Valladolid

C.I: 0104545322



Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Franklin Medardo Pillco Valladolid en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “ANÁLISIS Y MODELADO DE BATERÍAS DE ION LITIO PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, marzo de 2018.



Franklin Medardo Pillco Valladolid

C.I: 0104545322

AGRADECIMIENTO

Agradecerle primeramente a Dios ya que, gracias a sus bendiciones y voluntad, me ha permitido contar de manera incondicional con el apoyo de mis padres Manuel y Zoila en todo este proceso de formación, agradezco también a mis hermanos Mayra, Diana, Miguel, Patricio, Angélica y sus familias, quienes me han apoyado de manera constante y sin condiciones desde un inicio en esta etapa de formación académica.

Agradecerle de manera muy especial al director de este trabajo de titulación, PhD Luis González, quien con verdadero compromiso de un profesional y amigo me ha apoyado, guiado y enseñado, para que este trabajo concluya con éxito.

Franklin Pillco V.



DEDICATORIA

Más que una dedicatoria es un agradecimiento y reconocimiento al apoyo, confianza y al compromiso que he obtenido de mi esposa Jackeline Alexandra y de mi hijo José David, ya que este más que un logro personal, es un logro de los tres, al cual le invertimos esfuerzo, dedicación, paciencia y conformidad.

Franklin Pillco V.

ACRÓNIMOS

VE	Vehículo Eléctrico.
VEH	Vehículo Eléctrico Híbrido.
VEHP	Vehículo Eléctrico Híbrido Paralelo.
VEHS	Vehículo Eléctrico Híbrido Serie.
VEB	Vehículo Eléctrico a Batería.
VECH	Vehículo Eléctrico con Celdas de Hidrógeno.
VCI	Vehículo de Combustión Interna.
DOD	Profundidad de Descarga.
SoC	Estado de carga.
C	Capacidad.
VOC	Voltaje de Circuito Abierto.
PD	Pulso de Descarga.
PC	Pulso de Carga.
CE	Circuito Equivalente.
kW	Kilovatio.
kWh	Kilovatio Hora.
MCI	Motor de Combustión Interna.
ZEV	Vehículo con Emisión Cero.
BMS	Sistema de Gestión de Estructuras.
OBD	Diagnostico a Bordo.
EPA	Agencia de Protección Ambiental.
PNGV	Asociación para una Nueva Generación de Vehículos.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN, VEHÍCULO ELÉCTRICO Y SUS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

1.1 Introducción

La demanda de energía desde la sociedad preindustrial hasta la actualidad, ha dejado como evidencia que la energía es la base para el desarrollo tanto económico como social. En todo el mundo, la demanda de energía en los últimos años ha aumentado de forma exponencial debido al crecimiento poblacional y a diferentes desarrollos tecnológicos. Una de las principales fuentes de energía primaria en el mundo ha sido los combustibles fósiles y sus derivados. Sin embargo, el uso desmedido de este tipo de energía, ha provocado el agotamiento de estos recursos naturales que no son renovables y que son perjudiciales tanto para la salud como para el ambiente.

Al ser el transporte por carretera con motor de combustión interna uno de los principales consumidores de combustibles fósiles en el mundo, con casi un 50% del total (IEA, 2017), se pretende desde hace algunos años cubrir esta demanda con nuevas fuentes energéticas más limpias y menos contaminantes conocidas como energías renovables, las cuales en la actualidad están tomando mucho protagonismo ya que es una preocupación mundial el cambio agresivo del clima. Con este nuevo enfoque que se tiene para el futuro del transporte, se han venido desarrollando y mejorando nuevas tecnologías desde hace algunos años para cumplir este cometido, tal es el caso del Vehículo Eléctrico VE y el Vehículo Eléctrico Híbrido VEH, que son propulsados por motores eléctricos y de combustión interna, según sea el caso.

El motor eléctrico que se emplea en esta nueva tecnología del vehículo eléctrico llega a ser una carga móvil, el cual hace uso de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. Estos sistemas pueden estar constituidos por celdas de combustible, módulos de baterías, supercapacitores o sistemas híbridos.

En este trabajo se estudian los sistemas de almacenamiento basados en la tecnología de Ion Litio. La tecnología del Ion Litio es un tipo de acumulador de energía eléctrica la cual en comparación con otras tecnologías la convierte en una de las principales opciones hoy en día para aplicaciones de tracción eléctrica debido a la energía específica y densidad de energía que ofrece.

Los estudios que se desarrollan para el análisis de los diferentes sistemas de los vehículos de tracción eléctrica, necesitan modelos para las simulaciones de sus sistemas. En este caso de los acumuladores de energía, esto con el fin tener una línea de referencia del comportamiento del sistema de almacenamiento del mismo. Es la razón por la cual en este estudio se analizan los diferentes modelos de circuitos equivalentes que reproducen el comportamiento de los acumuladores de Ion Litio, para luego aplicarlos en el modelado de dos celdas acumuladoras de gran capacidad que las hacen aplicables en sistemas de tracción eléctrica. Además, se desarrolla el modelado de un banco acumulador ensamblado en un vehículo eléctrico comercial, el cual se



compara el comportamiento de dos bancos acumuladores conformados con las celdas modeladas.

1.2 Justificación

La energía en todas sus formas ha sido y sigue siendo uno de los principales pilares para el desarrollo socio-económico de los países. Entre las diversas fuentes primarias de energía están los combustibles fósiles que según la International Energy Agency 2017, el transporte de carretera es uno de los principales consumidores de este tipo de energía primaria, llegando servirse del 49,7% de la demanda mundial del petróleo hasta el año 2015. En este contexto en el Ecuador el transporte terrestre llega a consumir el 84% de la energía total (destinada para el sector del transporte) del país [1]. Llegando a ser el responsable del 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero (dentro del sector energético) como lo demuestran estudios desarrollados en [2].

Para hacer frente a este modelo que es insostenible en el tiempo, dada la cantidad finita de recursos fósiles, a nivel mundial se viene desarrollando tecnologías con el fin de reducir el uso de combustibles fósiles y cuidar el medio ambiente. En forma específica, el Estado ecuatoriano ha implementado varios tipos de incentivos con el fin de promover el consumo de energía eléctrica y reducir el uso de combustibles fósiles. Esto se da luego de que la capacidad de generación eléctrica del país se ampliara a 6799 MW [3].

Entre las diferentes tecnologías que se van implementando en el mundo para reducir el consumo de combustibles fósiles, están los vehículos eléctricos. Esta tecnología puede satisfacer la necesidad de transporte urbano sin emisiones, incluso teniendo en cuenta las emisiones generadas al operar las plantas de energía para alimentar a los vehículos, las emisiones serían insignificantes en comparación con las actuales. Además, el vehículo eléctrico acompañado con políticas adecuadas de incentivos mejoraría la curva de demanda de energía eléctrica alrededor del mundo.

Los estudios dirigidos al análisis y desarrollo del vehículo eléctrico, así como de sus sistemas complementarios, requieren de modelos de los elementos que conforman el vehículo, tal es el caso del sistema de acumuladores de energía, esto con el fin de simular el comportamiento del vehículo ante distintos escenarios de funcionamiento.

En esta investigación se lleva a cabo el modelado de dos tipos de celdas electroquímicas comerciales de la tecnología del Ion Litio, la primera de la marca "Samsung SDI de 68Ah" y la segunda de la marca "A123 Systems de 20Ah modelo AMP20M1HD-A". La capacidad, energía específica y densidad de energía de cada una de estas celdas, hacen que sean aplicables en sistemas de almacenamiento de vehículos eléctricos ya que en aplicaciones de tracción eléctrica se requiere que su sistema de almacenamiento de energía tenga menor masa y volumen, lo que se repercute en mayor eficiencia y autonomía del vehículo.



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar los modelos de baterías e identificar el que mejor reproduzca el comportamiento real de las celdas de Ion Litio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Describir a detalle el sistema de almacenamiento estudiado.
- Analizar los procedimientos de modelados.
- Analizar los diferentes modelos que existen en la actualidad.
- Aplicar los datos característicos de la celda de Ion Litio en los modelos eléctricos implementados.
- Validar de forma experimental los modelos analizados.
- Comparar los modelos de acuerdo a los resultados obtenidos.

1.4 Vehículo Eléctrico

La tecnología del vehículo eléctrico en sus inicios se quedó estancada alrededor del año 1920, dado que los sistemas de acumuladores de energía eran uno de sus principales inconvenientes. Robert Davidson en 1842 construyó un vehículo eléctrico de cuatro ruedas no tripulable, para el cual utilizaba baterías de zinc ácido. El consumo de zinc de una batería resultaba ser cuatro veces más costoso que el carbón de una máquina de vapor que era el principal oponente del motor eléctrico de aquel tiempo [4]. Ya a finales de la década de 1850 Gaston Planté inventó la batería de Plomo Ácido que aún se utiliza en los motores de arranque de los vehículos de combustión interna.

Durante el siglo XIX, paralelamente a los motores eléctricos, también se fueron desarrollando las baterías eléctricas, de tal manera que en el año 1898 se comercializaron los primeros modelos de vehículos eléctricos con motor de corriente continua. En la primera década del siglo XX ya se comercializaban varios modelos de vehículos eléctricos con motor de corriente continua los cuales tenían una autonomía de 20Km y 30Km, podían alcanzar velocidades de hasta 25Km/h. Los primeros vehículos con motor de combustión interna aparecieron alrededor del año 1920, con las desventajas de ser ruidosos, emanar olores fuertes a gasolina y hacer uso de una manivela para dar un impulso inicial al motor, de tal manera que no eran competitivos a los vehículos eléctricos.

Entre los años 1920 y 1930, con la invención del motor de arranque que reemplazaría a la molesta manivela y el descubrimiento de gran cantidad de petróleo en Texas y otros estados de USA, se abarató el precio del combustible y por ende de los vehículos de combustión interna, los cuales para aquel entonces tenían una autonomía

prácticamente ilimitada en comparación a su homólogo eléctrico de igual precio el cual carecía de un buen sistema de acumulación de energía. Con la combinación de todos estos factores a favor del vehículo de combustión interna y en contra del eléctrico, se permitió construir carreteras para unir las ciudades y ya para finales de la década de 1920 se dejaron de fabricar los vehículos eléctricos.

Con el vehículo de motor de combustión interna como la principal opción en el mercado, se modificaron los modelos de vida de las personas, desde entonces las ciudades y la economía crecen en forma acelerada, las personas pueden desplazarse desde sus hogares a sus lugares de trabajo varias decenas de kilómetros en sus vehículos. Pero este modelo no es sostenible en el tiempo, debido al incremento del precio del petróleo por su ya sentida carencia, además de que las personas van tomando conciencia sobre el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero. En el año 1970 el vehículo eléctrico tiende a resurgir, el cual en principio es lento, pero va avanzando en forma más segura ya que ha logrado modelos con mayor autonomía y con precios casi comparables a los de combustión interna, además de ofrecer al mercado distintas versiones como vehículos utilitarios, buses e incluso camiones de transporte de carga.

1.4.1 Tipos de Vehículos Eléctricos

Los principales vehículos eléctricos actuales se clasifican en tres tipos: Vehículos Eléctricos de Batería (VEB), Vehículo Eléctrico Híbrido (VEH) y Vehículo Eléctrico con Celdas de Combustible de Hidrógeno (VECH).

Los vehículos eléctricos son más convenientes que los convencionales de combustión interna ya que tienen características propias muy particulares; por ejemplo, poseen la capacidad de recuperación de energía cinética durante el frenado, cuentan con menos cantidad de enlaces rígidos y mecánicos, sus costos de operación son menores; tanto por el precio de la energía así como de mantenimiento, su impacto es de menor afección con respecto al medio ambiente, y entre otros factores que hacen que el vehículo eléctrico se profile hoy como el principal sustituto del vehículo tradicional.

Las principales características de los tres tipos de vehículos eléctricos se encuentran enlistadas en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Características de los tipos de vehículos eléctricos.
Fuente [5]

Tipos de Vehículos Eléctricos	Vehículo Eléctricos de Baterías	Vehículo Eléctrico Híbrido	Vehículo Eléctrico con Celdas de Combustible
Propulsión	<ul style="list-style-type: none"> • Motores eléctricos 	<ul style="list-style-type: none"> • Motores eléctricos • Motores de combustión interna 	<ul style="list-style-type: none"> • Motores eléctricos
Sistema de acumulación de Energía	<ul style="list-style-type: none"> • Baterías • Ultracapacitores 	<ul style="list-style-type: none"> • Baterías • Ultracapacitores • Centros de abastecimiento de combustibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Celdas de combustible • Necesita de baterías/ultracapacitores para aumentar la densidad de potencia
Instalaciones de abastecimiento de energía	<ul style="list-style-type: none"> • Estaciones de carga de la red eléctrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Estaciones de carga de la red eléctrica • Estaciones de combustibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrógeno • Producción y sistemas de transporte del hidrógeno
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Cero emisiones • Independientes de combustibles y aceites • Alto costo inicial • Disponible comercialmente 	<ul style="list-style-type: none"> • Muy bajas emisiones • Mayor autonomía • Disponible comercialmente • Depende de combustibles y aceites. • Mayor costo en comparación con los vehículos de motor de combustión interna 	<ul style="list-style-type: none"> • Ultra baja emisión • Alta eficiencia energética • Independiente de combustibles (no se utilizan para la producción del hidrógeno) • Autonomía adecuada • Alto costo • Aún en desarrollo
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Baterías y sus sistemas de gestión • Estaciones de recarga • Costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiples sistemas de control para la optimización y gestión de las fuentes de energía • Dimensionamiento y gestión de la batería 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de la celda de combustible, ciclo de vida y confiabilidad • Instalaciones de hidrógeno

1.4.1.1 Vehículos Eléctricos de Batería (VEB)

Este vehículo tiene la característica de ser puramente eléctrico, en el cual el sistema de almacenamiento de energía esta conformados por baterías o ultracapacitores, en este tipo de vehículos la propulsión se hace con motores de corriente alterna, por lo que se necesita de un convertidor de potencia DC/AC para convertir el voltaje de la batería y abastecer al motor. La autonomía de este vehículo depende directamente del sistema de acumulación de energía. Entre los vehículos comerciales con esta tipología está el Tesla Roadster [6].

1.4.1.2 Vehículo Híbrido (VEH)

Estos vehículos son propulsados por un motor eléctrico y un motor de combustión interna (MCI). Con el motor de combustión interna se consigue mayor autonomía,



mientras que con el motor eléctrico se consigue mayor eficiencia y reducción del costo en combustibles debido al frenado regenerativo. Este tipo de vehículo se divide en dos subcategorías debido a su tipología de construcción, estos son: el híbrido serie y el híbrido paralelo.

1.4.1.2.1 Vehículo Eléctrico Híbrido Serie (VEHS)

En este tipo de vehículos la propulsión mecánica del motor de combustión se transfiere al generador eléctrico, obteniendo así una corriente que es inyectada al sistema de acumulación de energía, el motor-generador eléctrico por su parte es abastecido de la energía del acumulador y de esa manera conseguir la propulsión del vehículo al pasar la salida mecánica del motor eléctrico al sistema de transmisión. Otra manera de operar este vehículo es que la corriente que se obtiene del generador puede abastecer al motor-generador directamente sin pasar por el acumulador. En todo este proceso los convertidores de potencia deben ser lo más eficientemente posible con el fin de minimizar las pérdidas de energía. Al igual que el VEB este tipo de vehículo también cuenta con el sistema de frenado regenerativo.

En teoría este tipo de vehículo tiene mayor autonomía que el vehículo convencional de combustión, pero tiene la desventaja de ser menos eficiente ya que al tener el conjunto de propulsión conformado por el motor de combustión, generador y motor eléctrico, el vehículo debe estar diseñado para toda esta capacidad de carga lo cual sería muy costoso para un recorrido por menor que sea. Conceptualmente, es un VEB asistido por un MCI que tiene como objetivo extender el rango de conducción comparable con la del vehículo convencional [5]. Un vehículo comercial de estas características esta por ejemplo el Toyota Prius [6].

1.4.1.2.2 Vehículo Eléctrico Híbrido Paralelo (VEHP)

En este tipo de vehículo es posible suministrar torque mecánico solo desde el motor de combustión interna, solo del motor eléctrico o por los dos en conjunto al sistema de transmisión a través de embragues individuales. Este tipo de vehículo es más eficiente que el híbrido en serie ya que el motor-generador eléctrico abastece al sistema de almacenamiento con la energía que capta del frenado regenerativo o cuando absorbe el exceso de la salida del motor de combustión interna. Los motores de combustión interna y eléctrico en los VEHP son más pequeños que sus homólogos en los VEHS, de tal manera que el VEHP es mucho más eficiente. Conceptualmente, es un vehículo de combustión interna (VCI) asistido por electricidad para lograr emisiones más bajas y menor consumo de combustible [5]. Entre las marcas comerciales con estas características está el Toyota Prius Plugin [6].

La distribución de los componentes fundamentales en los distintos tipos de vehículos eléctricos puede ser visto en la Figura 1.1.

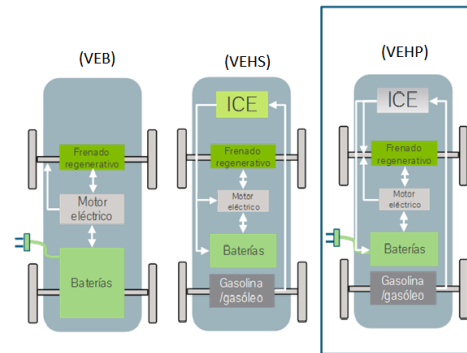


Figura 1.1: Tipología de vehículos eléctricos.
Fuente: [7]

1.4.1.3 Vehículos Eléctricos con Celdas Combustible de Hidrógeno (VECH)

Este tipo de vehículo hace uso de celdas de combustible que generan electricidad a partir del hidrógeno. Los VECH se pueden considerar como los híbridos en serie, ya que las electricidades generadas por las celdas de combustible pasan antes por el sistema acumulador de energía para llegar al motor-generator. La Figura 1.2, muestra la arquitectura de un vehículo eléctrico a partir de una celda de combustible de hidrogeno.

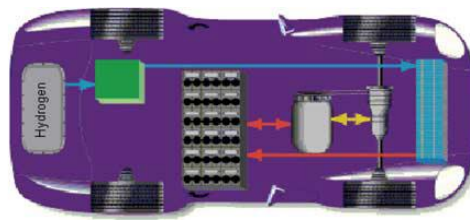


Figura 1.2: Arquitectura del VECH.
Fuente: [5]

1.5 Batería Electroquímica

Es un dispositivo capaz de acumular energía en forma electroquímica, es decir, almacena energía en forma química para luego ser entregada a la carga en forma de electricidad.

Las tecnologías de las baterías electroquímicas desde sus inicios se han clasificado en dos categorías como son: las primarias y las secundarias. Las baterías primarias se

caracterizan así porque la conversión de energía química a eléctrica es irreversible, mientras que la batería secundaria tiene la ventaja de que una vez descargadas, pueden volver a ser abastecidas de energía al conectarse a una fuente de corriente continua.

El funcionamiento general de las baterías, se basa en el funcionamiento del elemento base de la misma denominada celda electroquímica, la celda electroquímica está formada por dos electrodos denominados ánodo y cátodo. En el ánodo se lleva a cabo la oxidación (cede electrones) y en el cátodo se efectúa la reducción (capta electrones) cuando se da el proceso de transformación de energía química a eléctrica (descarga de la celda). Los electrodos están inmersos en electrolito en forma separada físicamente, pero conectados eléctricamente por un puente salino [8].

Generalmente se denomina baterías a la conexión de un grupo de celdas, pero indistintamente se conoce como acumuladores de energía eléctrica tanto a las baterías como a las celdas en forma individual.

1.5.1 Aplicaciones de las Baterías Secundarias (Recargables)

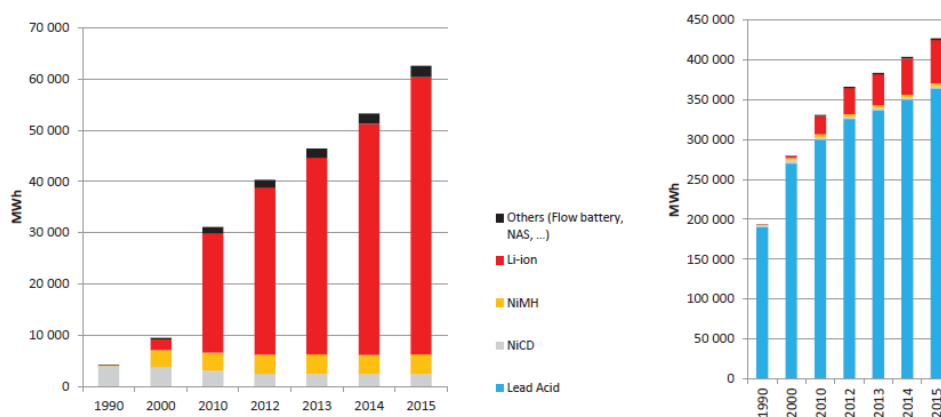
Algunas de las tecnologías de baterías secundarias actualmente disponibles en el mercado, sus principales características sus posibles aplicaciones se resumen en la tabla 1.2.

Tabla 1.2: Características y aplicaciones principales de las baterías recargables.
Fuente: [9]

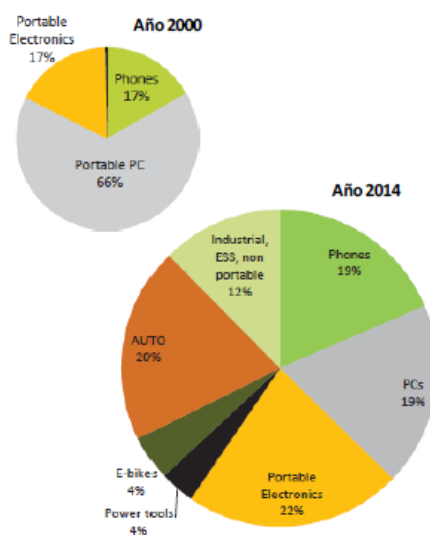
Tecnología	Características	Aplicaciones
Níquel-Cadmio (Ni-Cd)	Herméticas, sin mantenimiento, buen rendimiento a baja temperatura, ciclo de vida excelente.	Portátil. Artículos electrónicos, juguetes, teléfonos portátiles. Industrial. Batería para aeronaves, aplicaciones industriales y emergencia, equipos de comunicación.
Níquel Metal Hidruro (Ni-HM)	Herméticas, sin mantenimiento, más capacidad que las baterías de níquel de cadmio.	Electrónica de consumo y otras aplicaciones portátiles, vehículos eléctricos e híbridos eléctricos.
Ion Litio (Ion-Li)	Elevada energía específica y densidad de energía, largo ciclo de vida.	Celulares, computadores, sistemas portátiles, vehículos eléctricos e híbridos eléctricos.
Plomo Ácido (Pb-Ácido)	Herméticas, sin mantenimiento, bajo coste, ciclo de vida moderado.	Uso automotriz, industria y doméstico, tracción eléctrica.

1.5.2 Desarrollo de las Tecnologías de Acumuladores

El desarrollo de las diferentes tecnologías de los acumuladores en los últimos años no se ha detenido, si bien es cierto que el crecimiento de la tecnología del Ion Litio se ha impuesto sobre las demás en cierta medida (por su requerimiento en el vehículo eléctrico y nuevos sistemas que requieren acumuladores con mayor densidad de energía). Tecnologías como la del Plomo Ácido también se ha desarrollado a gran escala para otras aplicaciones como las estacionarias. En la Figura 1.3, se puede ver el crecimiento de la capacidad de las diferentes tecnologías de acumuladores y las nuevas aplicaciones que se han desarrollado desde el año 2000 hasta el año 2015.



(a)



(b)

Figura 1.3: Desarrollo de las tecnologías de los acumuladores de energía eléctrica 2000-2015.
a) Desarrollo de las tecnologías de acumuladores del 2000 a 2015. b) Nuevas demandas del 2000 a 2014.

Fuente: [10]

Nota: Power Tools, Herramientas Eléctricas; Portable Electronics, Electrónica Portátil; Non Portable, No Portátil; Phones, Teléfonos; Portable PC, PC Portátil.

De la demanda actual de los acumuladores, las baterías de Ion Litio cubren el 40% del mercado [10]; esto se debe a la superioridad sobre las demás tecnologías que tiene en cuanto a su potencial, energía y potencia específica. En la Figura 1.4 se representa en un diagrama de Ragone las energías y potencias específicas que se pueden obtener de las diferentes tecnologías a acumuladores. Como es evidente, las baterías de Ion Litio son superiores tanto en energía y en potencia específica a las otras tecnologías que son maduras y han pasado por largos periodo de desarrollo.

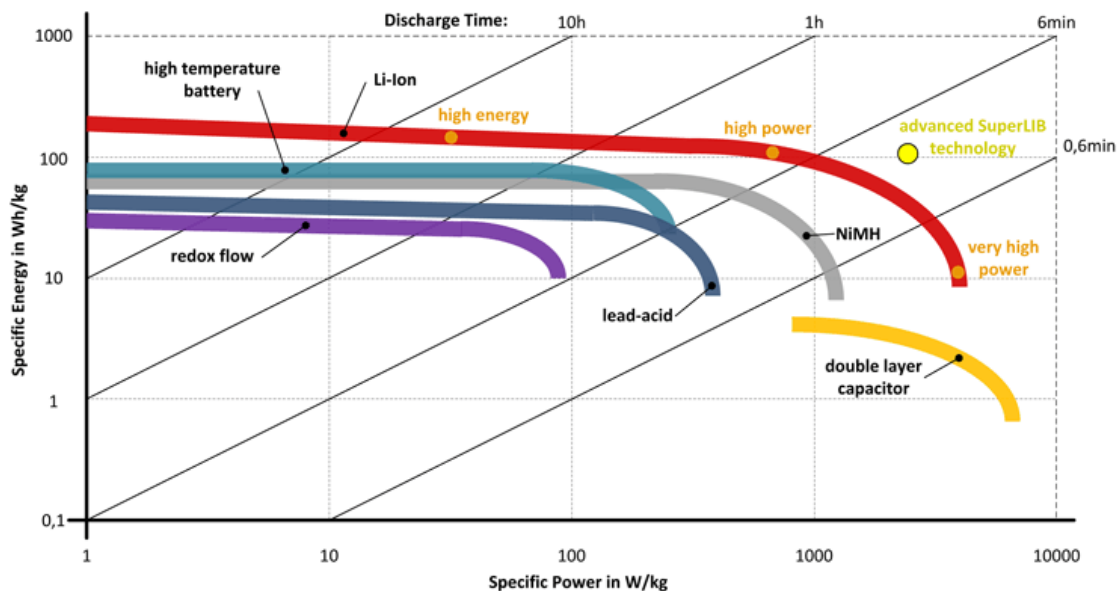


Figura 1.4: Densidad de energía de las tecnologías de acumuladores.

Fuente: [10]

Nota: Specific Energy, Energía Específica; Specific Power, Potencia Específica; High Temperature Battery, Baterías de Alta Temperaturas; Flow Redox, Flujo Redox; Advanced SuperLIB Technology, Tecnología Avanzada SuperLIB; Double Layer Capacitor, Capacitor de Doble Capa.

Al realizar una comparación entre las características de las dos tecnologías que más se han desarrollado en los últimos años, las baterías de Ion Litio superan y por mucho a las de Plomo Ácido. Entre las principales ventajas de las baterías de Ion Litio se encuentra su eficiencia energética, la cual a una velocidad de descarga grande la capacidad de la batería no se deteriora en gran medida como en el caso de las de Plomo Ácido. Una de las principales restricciones en la tecnología de Ion Litio es que los rangos de temperaturas no deben ser superados, debido a que se puede degradar y en consecuencia reducir el tiempo de vida útil de las baterías. Sin embargo, la mayor desventaja que presentan estos acumuladores es su costo de energía, el cual sumado a los costos de los elementos de protección que requiere este tipo de tecnología, hace

que su aplicación se limite a cierto sector (carga móvil). En la tabla 1.3 se presentan las principales características de las baterías de Ion Litio y de las baterías de Plomo Ácido que se tienen hasta el año 2016.

Tabla 1.3: Tecnología del Ion Litio vs Plomo Ácido.

Fuente: [10]

	Ion-Litio	Plomo Ácido
Eficiencia (1C - 0.10C)	90% - 99 % ✓	60 % - 90 %
Energía específica	100 Wh/kg - 300 Wh/kg ✓	30 Wh/kg - 50 Wh/kg
Potencia específica	300 W/kg - 1800 W/kg ✓	150 W/kg - 200 W/kg
Rango de temperaturas	-30°C - 60°C ✓	-5°C - 40°C
Ciclos de vida (80% DOD)	1000 - 8000 ✓	500 - 2000
Vida en almacenamiento	5 años - 20 años ✓	5 años - 15 años
Coste de energía	300 €/ kWh - 1000 €/ kWh ✗	60 €/ kWh - 250 €/ kWh

Por un informe (encuesta realizada a 50 empresas) emitido por la consultora Bloomberg, se sabe que el precio actual de las tecnologías de los acumuladores de Ion Litio oscila alrededor de 209\$/kWh (teniendo en cuenta los servicios adicionales para el montaje en un vehículo) [11]. Tomando en cuenta la predicción de la reducción exponencial del precio del kWh de los acumuladores de Ion Litio (Figura 1.5) de este mismo informe, se sabe que para el año 2025 el VE será competitivo con el VCI ya que el precio se reducirá a 100\$/kWh.

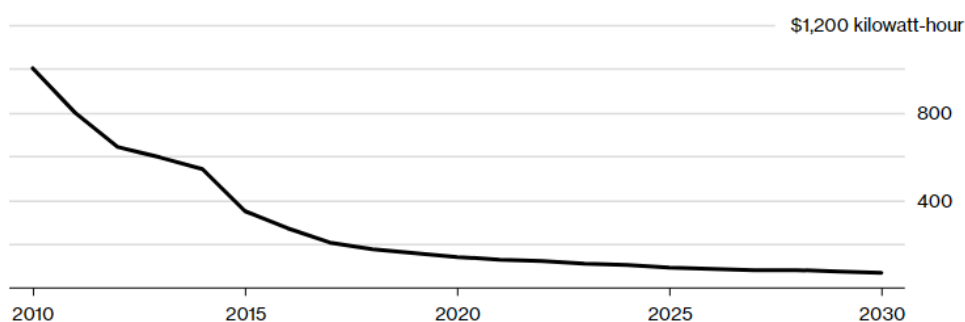


Figura 1.5: Tendencia del precio de la tecnología del Ion Litio.

Fuente: [11]

Nota: kilowatt-hour, kilovatios-hora.

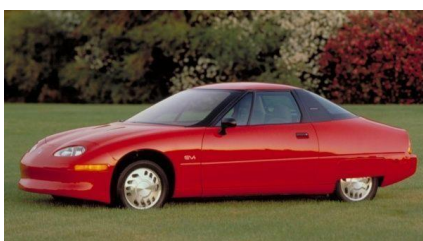
1.5.3 Baterías con Mayor Aplicación en Vehículos de Tracción Eléctrica

De la tabla 1.2 se puede discernir que tanto las baterías de Plomo Ácido, Níquel Hidruro Metálico e Ion Litio, son las que mayor aplicación tienen en los VE y VEH, a continuación, se ven algunos de los vehículos comerciales que emplean estos sistemas de acumulación.

1.5.3.1 Baterías de Plomo Ácido en (VEB)

Gracias al voltaje nominal ($2V$) por celda en la mayoría de baterías de Plomo Ácido, y la rápida cinética de reacción de los electrodos (favorable cuando son empleados en vehículos eléctricos al momento de frenar o acelerar) que presentan este tipo de acumuladores, fue posible que la compañía General Motors (GM) creara el vehículo eléctrico EV1 (Figura 1.6.a). El EV1 fue competitivo con los de motor de combustión interna, tenía un sistema de acumulación de energía que consistía de 26 baterías de Plomo Ácido con un peso de $500kg$, este sistema era capaz de almacenar $16,3kWh$, dándole al vehículo una autonomía de $140km$ y la posibilidad de llegar a una velocidad máxima de $130km/h$. Este vehículo fue creado cuando se implanto el mandato Vehículo con Emisión Cero (ZEV, por sus siglas en inglés) en California y de igual forma fue destruido por la compañía GM cuando el mandato que lo creó fue revocado.

Actualmente las baterías de Plomo Ácido son empleadas en los VE Reva-i (Figura 1.6.b), de la compañía Reva Electric Car. Con una combinación “8S” de $6V$ cada una y una capacidad total de $195Ah$ [9]; este vehículo tiene una autonomía de $80km$ en la ciudad y $65km$ en carreteras, es un vehículo de dos plazas con un sistema de acumulación de energía que se carga hasta el 80% de su capacidad en 2,5 horas, y el 100% de su capacidad en 8 horas.



(a)



(b)

Figura 1.6: a) VE EV1 de la GE. b) VE Reva-i de Reva Electric Car.

Fuente: [12] [13]

Entre las principales desventajas que presentan este tipo de baterías en la actualidad y que limita su aplicación en los VE, está la baja energía específica que ofrecen ($30Wh/Kg - 50Wh/Kg$) debido principalmente al peso elevado de los compuestos de

plomo, la limitada ciclabilidad (que es el máximo número de ciclos que puede soportar un acumulador electroquímico en condiciones determinadas, manteniendo valores específicos de funcionamiento y eficiencia [14]), además del desprendimiento de gases como el hidrógeno & oxígeno desde los electrodos en la etapa de carga hace que este tipo de baterías sea un peligro, ya que estos gases (hidrógeno) son inflamables.

1.5.3.2 Baterías de Níquel Hidruro Metálico en (VEH)

La energía específica de estos acumuladores de alrededor de ($60Wh/kg - 80Wh/kg$) y su característica de soportar cargas rápidas (de 1 a 3 horas además de que hace posible que la captura de energía del VEH sea eficiente), ha hecho posible que entre los vehículos híbridos comerciales más exitosos este el Toyota Prius 2010 (Figura 1.7.a), este vehículo tiene un sistema acumulador (Figura 1.7.b) de energía conformado 168 celdas de NiHM de 1,2V. El banco tiene un voltaje nominal de 201,6V, una capacidad específica de 6,5Ah y una energía eléctrica almacenada de 1,31kWh. La autonomía de este vehículo está alrededor de 150km.



(a)



(b)

Figura 1.7: a) VEH Prius de Toyota. b) Sistema de acumulación de energía.
Fuente: [15] [16]

La desventaja de este tipo de baterías radica en que el hidruro metálico del electrodo negativo, sufre una grave corrosión en el medio alcalino del electrolito [9], de esta manera se reduce considerablemente la recargabilidad del acumulador, traduciéndose en una disminución del número de ciclos de vida. El costo elevado también juega en contra de este sistema de acumulación de energía, ya que supera en cuatro veces al sistema de acumulación del Plomo Ácido, el efecto de memoria que los acumuladores de NiHM presentan son considerables, este efecto se debe a cambios en la estructura del electrodo positivo cuando la batería es sobrecargada.

1.5.3.3 Baterías de Ion Litio en (VEB) y (VEH)

Las baterías de Ion Litio son las favoritas hoy en día en aplicaciones de VE y VEH, esto se debe a que esta tecnología es superior en aspectos como el voltaje nominal (3V a 4 V), la alta energía específica ($100Wh/kg - 300Wh/kg$), el mayor número de ciclos

de vida (capacidad del 80% después de 8000 ciclos) a las que ofrecen tecnologías como el NiHM y Plomo Ácido. La firma Tesla ha acogido esta tecnología en sus principales vehículos comerciales, los Modelos S y X totalmente eléctricos han conseguido una autonomía de $370km$ y $475km$ respectivamente. Otro vehículo totalmente eléctrico de la firma Tesla es el Modelo 3 (Figura 1.8.a), según la Agencia de Protección Ambiental norteamericana (EPA) en la certificación de este vehículo, la batería que se emplea en el Modelo 3 tiene un voltaje nominal de $350V$ y una capacidad $230Ah$, consiguiendo de esta manera una potencia máxima de $80,5kWh$. El Pack de baterías (Figura 1.8.b) empleadas en el Modelo 3 estándar de $50kWh$ se conforma de 2976 celdas de $21mm$ de diámetro por $70mm$ de alto conocidas como (2170) (Figura 1.8.c). La autonomía de este vehículo según EPA está en $557km$ en la ciudad y $512km$ en carretera.



(a)



(b)



(c)

Figura 1.8: Características del VE Tesla Modelo 3.

- a) VEB Modelo 3 de Tesla. b) Sistema de acumulación de energía del Modelo 3.
c) Celda del pack del Modelo 3.

Fuente: [17] [18]

El mayor conflicto en la aplicación de la tecnología de Ion Litio se debe a que su precio es muy elevado, el embalaje especial, el empleo de circuitos de protección para evitar sobrecargas/sobredescargas así como también evitar que opere en altas temperaturas ($>60^{\circ}C$) para no reducir su rendimiento, hace que esta tecnología sea la más costosa. Sin embargo, el beneficio obtenido es mucho mayor que el que se obtiene de sus principales competidores (NiHM y Plomo Ácido) en aplicaciones como los vehículos eléctricos, razón por la cual se vienen desarrollando estudios para la mejora de esta tecnología muy prometedora.



Con la revisión de las diferentes tecnologías de acumuladores electroquímicos, se puede concluir que las que baterías de Ion Litio tiene las mejores prestaciones para los requerimientos energéticos de los vehículos eléctricos. Sin embargo, en aplicaciones como sistemas de acumulación estacionaria, se puede implementar baterías de Plomo Ácido debido a que en este tipo de aplicaciones no es un problema el espacio o el peso que estas presentan, además de que tienen un desarrollo muy avanzado actualmente.



CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES ACERCA DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO A MODELAR “ACUMULADORES DE ION LITIO”

Las baterías de Ion-Litio comercializadas desde 1991, luego de que numerosas investigaciones desarrolladas en laboratorios de EEUU, Japón y Europa demostraran que era posible la inserción y separación de Iones de Litio desde cualquier compuesto químico, encabezan las listas en cuanto a sistemas de almacenamiento de energía eléctrica para vehículos eléctricos se refiere, esta preferencia se debe a que la batería de Ion Litio cumple lo más cercano a la perfección con las características requeridas por los vehículos que hacen uso de la electricidad para su tracción.

En este capítulo se revisan las diferentes tecnologías de baterías dentro de la familia del Ion Litio, su funcionamiento y los parámetros característicos de un acumulador.

2.1 Tipos de Baterías de Ion Litio

Las baterías de Ion Litio están compuestas de celdas conectadas en serie y/o paralelo, todo esto en función de las características eléctricas y de la capacidad de almacenamiento de energía que sea requerida por la carga, las celdas de las baterías de Ion Litio constan de un electrodo positivo, un electrodo negativo y un separador, todos inmerso en un electrolito.

En el mercado hay una gran variedad de tecnologías de baterías dentro de la familia del Ion Litio, las cuales se clasifican por la forma y diseño de las celdas, la química de sus componentes, pero principalmente por la de energía y potencia específica que ofrecen de acuerdo a su química.

2.1.1 Tipos de baterías de Ion Litio por su Forma de Diseño

Entre las formas de diseño que se pueden encontrar este tipo de acumuladores están las de tipo Cilíndricas, Prismáticas y Pouch.

Las celdas de tipo cilíndricas (Figura 2.1) es un diseño que se ha venido desarrollando en forma constante desde los inicios de la tecnología del Ion Litio, de tal manera que su formato de diseño se encuentra estandarizado, su tamaño varía desde las conocidas como ‘18650’ en adelante. Cuando estas son aplicadas a módulos tiene una baja densidad de energía debido a su forma física ya que se pierde espacios. Sin embargo, son las de menor precio energético (kWh) en comparación con las de tipo prismático y pouch. Entre los principales fabricantes de este tipo de acumuladores esta la marca Samsung, Panasonic, Tesla, etc.

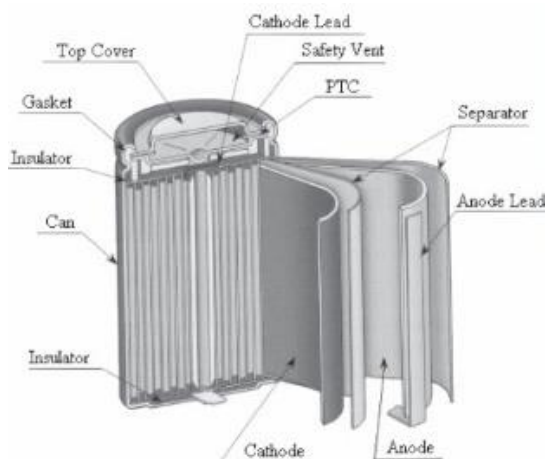


Figura 2.1: Celdas de Ion Litio tipo Cilíndricas.

Fuente: [19]

Nota: Insulator, Aislante; Can, Lata; Gasket, Contenedor; Top Cover, Cubierta Superior; Cathode Lead, Cátodo de Plomo; Safety Vent, Ventilador de Seguridad; Separator, Separador; Anode Lead, Ánodo de Plomo.

Las celdas de tipo prismáticas (Figura 2.2) se han creado principalmente por las aplicaciones que requieren mayor densidad de energía, este tipo de celdas no tiene un formato estandarizado para su diseño, de tal manera que se encuentran una gran variedad en el mercado. Los principales fabricantes de este tipo de celdas son Samsung, Maxwell, Toshiba, etc.

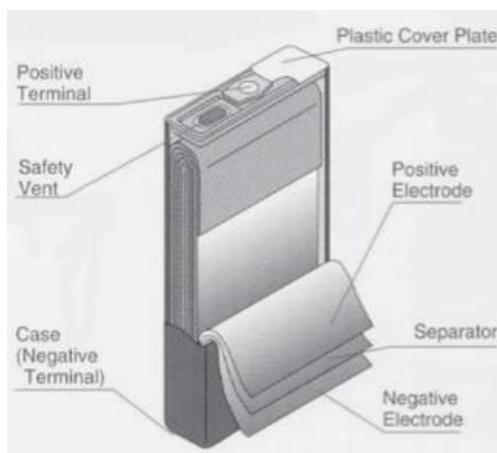


Figura 2.2: Celdas de Ion Litio tipo Prismáticas.

Fuente: [19]

Nota: Negative Terminal, Terminal Negativo; Safety Vent, Ventilador de Seguridad; Positive Terminal, Terminal Positivo; Plastic Cover Plate, Placa de Cubierta de Plástico; Positive Electrode, Electrodo Positivo; Separator, Separador; Negative Electrode, Electrodo Negativo.

Las celdas de tipo pouch (Figura 2.3) tiene una gran densidad de energía específica, lo que va haciendo que su aplicación en varias marcas de vehículos eléctricos vaya aumentando. Este tipo de celdas soportan temperaturas altas de operación. Sin embargo, los costes energéticos en packs son mucho mayores que los que presentan los de tipo prismático y cilíndrico. Fabricantes como ATL, Kokam, A123 Systems, Sk Innovation se dedican a mejorar estos formatos de diseño cada vez más.

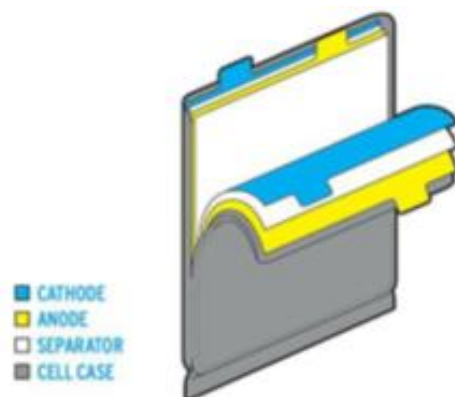


Figura 2.3: Celdas de Ion Litio tipo Pouch.

Fuente: [10]

Nota: Cathode, Cátodo; Anode, Ánodo; Separator, Separador; Cell Case, Envoltura Celular.

Entre los vehículos totalmente eléctricos que hace uso de bancos de baterías que están formados con los tres tipos de diseños de celdas descritos anteriormente se encuentran: el Tesla Modelo 3, BMW i3 y el Kia Soul (Figura 2.4) con celdas cilíndricas, prismáticas y pouch respectivamente.

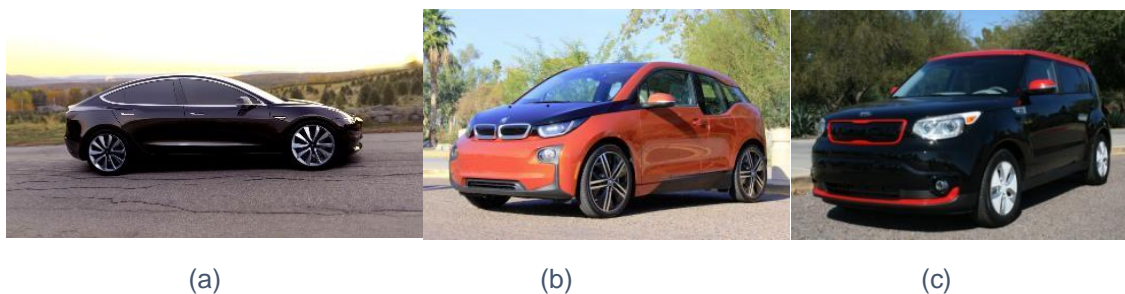


Figura 2.4: a) VE Tesla Modelo 3. b) VE BMW i3. c) VE Kia Soul.

Fuente: [17] [20] [21]

2.1.2 Tipos de baterías de Ion Litio por su Química

Los tipos de baterías de Litio se clasifican en tres tipos principalmente (debido al tipo de material químico empleado para la construcción de sus componentes), estos son: Litio Polímero (LCO en el cátodo), Litio Fosfato (LFP en el cátodo) e Ion Litio (LMO, NCM, NCA en el cátodo y LTO en el ánodo). En la Figura 2.5 se muestran las características de densidad de energía y energía específica que presentan las tecnologías dentro de la familia del Litio.

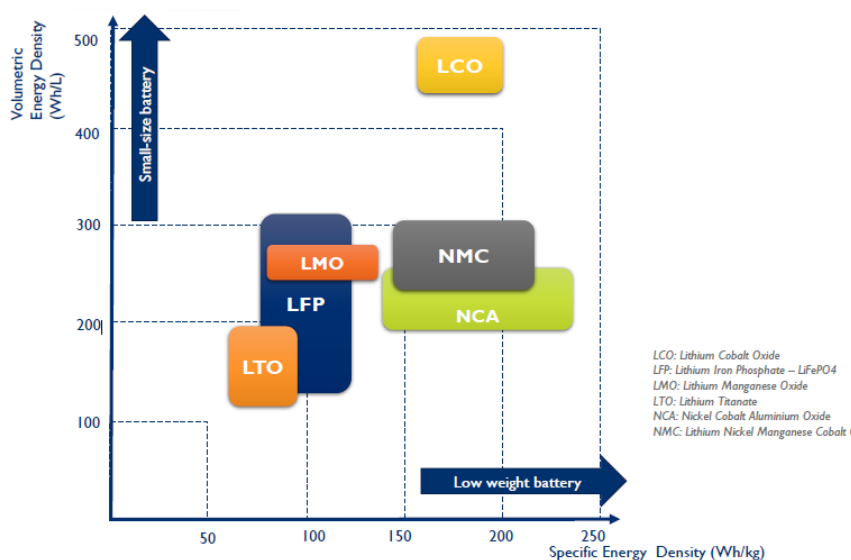


Figura 2.5: Energía específica vs densidad de energía de las tecnologías del Litio.

Fuente: [22]

Nota: Volumetric Energy Density, Densidad de Energía Volumétrica; Specific Energy Density, Densidad de Energía Específica, Low Weight Battery, Bajo Peso de la Batería; Small-Size Battery, Volumen Pequeño de la Batería.

En la Figura 2.6 se puede ver las características generales más descriptivas de las tecnologías de Litio, de las cuales la tecnología LCO presenta la mayor energía específica, mientras que la tecnología de LTO presenta valores reducidos en su energía específica y en sus precios en comparación con las otras, pero el grado de seguridad que presentan los acumuladores de tipo LTO está entre los más altos junto con el presentado por los acumuladores tipo LFP, tecnología la cual tiene un mayor valor en su potencia específica.

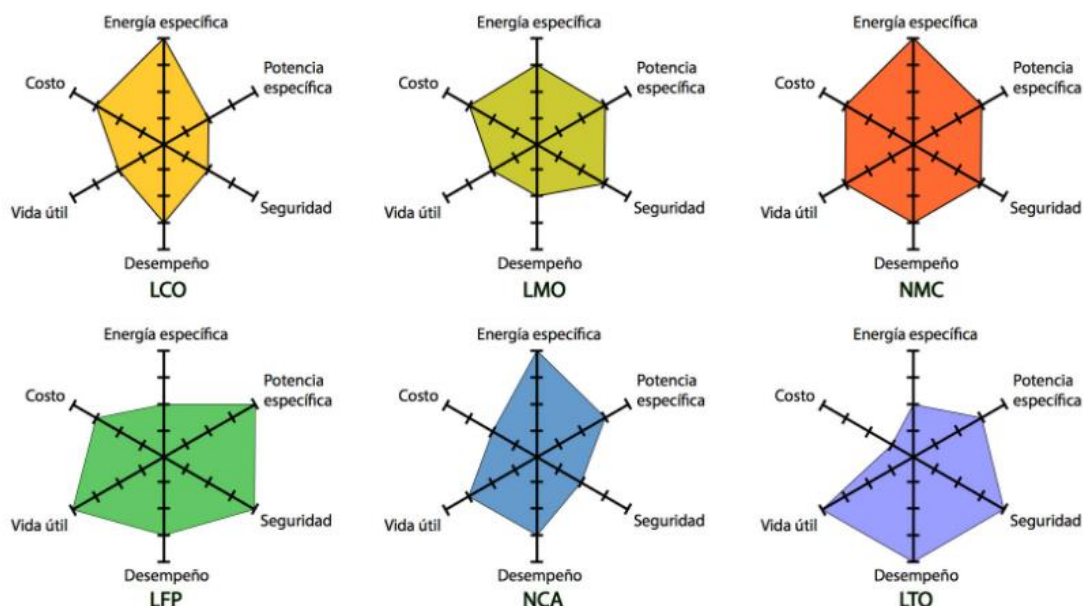


Figura 2.6: Características de las tecnologías de Ion Litio.

Fuente: [23]

De las seis subcategorías de los acumuladores de Litio, tres de ellas (LCO, NMC y NCA) presentan una mayor densidad de energía específica, lo que se traduce en que se puede obtener mayor energía por el mismo peso que otros elementos. Sin embargo, la tecnología del LFP es una tecnología que se está imponiendo en el mercado ya que en este campo se tiene que considerar además de la energía específica, la seguridad, los costes, vida útil y la ciclabilidad [10]. Se podría decir que las tecnologías con mejores prestaciones en cuanto a rendimiento y energía específica son las de tipo; NCA y NMC, pero todo depende de las aplicaciones para las que son requeridas, lo que implica el considerar las otras tecnologías, como por ejemplo en aplicaciones de automoción se buscan alta densidad de energía específica, así como alta densidad de energía volumétrica lo que implica también un costo superior. Por otra parte, para aplicaciones estacionarias en donde se dispone de gran espacio, no es un problema muy relevante las altas densidades de energía y potencia.

Las aleaciones adicionales realizadas para la construcción del material activo (ánodo y cátodo) de los acumuladores de Ion Litio, se debe a los requerimientos en las diferentes aplicaciones del acumulador. A continuación, se presenta en la tabla 2.1 una descripción del compuesto químico que conforman el ánodo y el cátodo en función a las aplicaciones que se le da al acumulador.

Tabla 2.1: Composición química de los materiales activos de acumuladores Ion Litio.
Fuente: [10]

Cátodo	LiCoO_2	<ul style="list-style-type: none"> Alta densidad energética Alta ciclabilidad Baja seguridad 	Teléfonos móviles Tablets
	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$	<ul style="list-style-type: none"> Alta densidad energética Alto rendimiento Coste elevado 	Pc portátil Automoción (Tesla) Estacionarios
	LiMn_2O_2	<ul style="list-style-type: none"> Baja densidad energética Bajo costo Alto rendimiento 	Automoción
	$\text{LiCo}_x\text{Ni}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$	<ul style="list-style-type: none"> Alta densidad energética Material muy utilizado Altas prestaciones Alta ciclabilidad 	Pc portátil Automoción (Tesla) Estacionarios
	LiFePO_4	<ul style="list-style-type: none"> 3.3 V Baja densidad energética Alta seguridad Buena relación vida/precio 	Herramientas de consumo Bicicletas eléctricas Automoción Estacionarios
Ánodo	Carbono	<ul style="list-style-type: none"> 3,7 V Baja ciclabilidad 	
	Grafito	<ul style="list-style-type: none"> 3,7 V Alta ciclabilidad Material muy utilizado 	
	Titanato ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)	<ul style="list-style-type: none"> 2,2V Baja densidad energética Muy seguro Alta ciclabilidad Alta densidad potencia 	
	Silicio ($\text{Li}_{22}\text{Si}_6$)	<ul style="list-style-type: none"> 3,7 V Alta densidad energética No comercial 	

En la Figura 2.7 se presenta una comparación de las distintas químicas empleadas en el cátodo de las tecnologías disponibles, en la cual se compara la densidad de la energía con respecto al grado de seguridad que brindan.

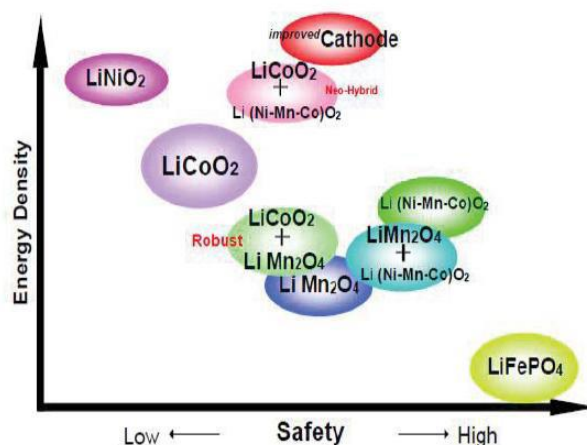


Figura 2.7: Energía específica vs nivel de seguridad por el material catódico.
Fuente: [10]

Nota: Energy Density, Densidad de Energía; Improved, Mejorado; Robust, Robusto; Low, Bajo; Safety, Seguridad, High, Alto.

El tipo de material del que está hecho el electrolito de los acumuladores de Litio son los basados en soluciones líquidas y polímeros conductores sólidos (secos y gel).

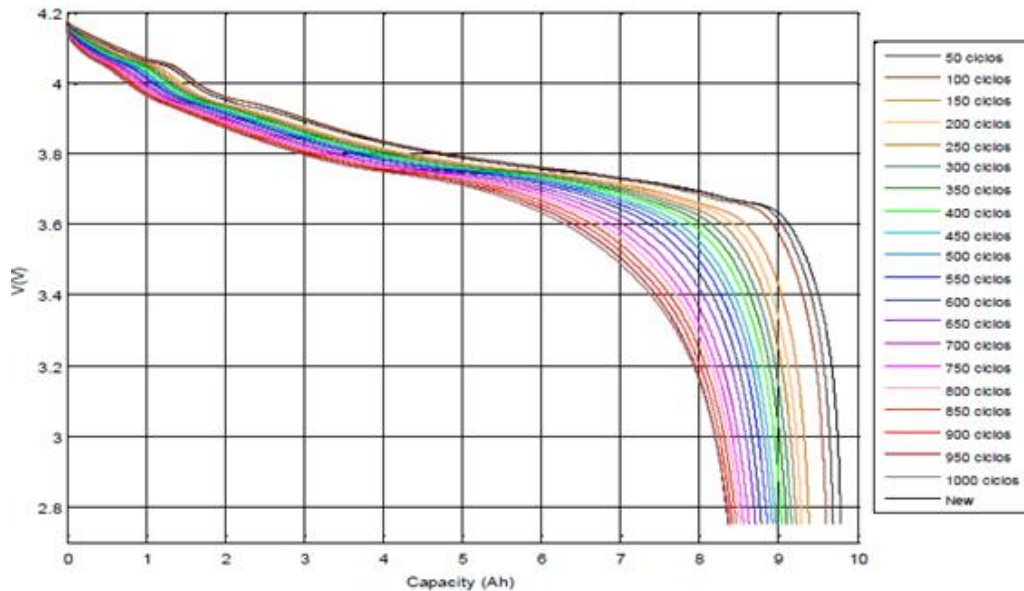
Entre los electrolitos que tiene soluciones líquidas y que son utilizados en la actualidad está el $LiPF_6$ en carbonatos orgánicos. Por su parte los electrolitos construidos con polímeros conductores sólidos tipo secos constan de una membrana polimérica que puede ser el polióxido de etileno y una sal de Litio como el $LiPF_6$. Finalmente, los electrolitos poliméricos gelificados están constituidos por los mismos componentes del electrolito tipo sólido seco con un disolvente orgánico adicional que actúa como plastificante.

El elemento que tiene la función de aislar eléctricamente a los electrodos denominado separador, es una membrana construida por láminas de polietileno (PE) o polipropileno (PP).

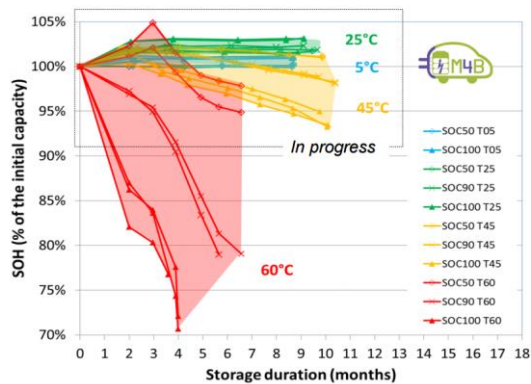
2.2 Degradación de los acumuladores de Ion Litio

La manera en que se degrada (reduce tiempo de vida) el acumulador depende directamente del número de ciclos que se le da al mismo. Entre los parámetros más importantes de los que depende del envejecimiento de los acumuladores están la disminución de la energía disponible debido a la pérdida de su capacidad. En la Figura 2.8.a se puede ver como la capacidad de una celda va disminuyendo en función al número de ciclos que tiene la misma.

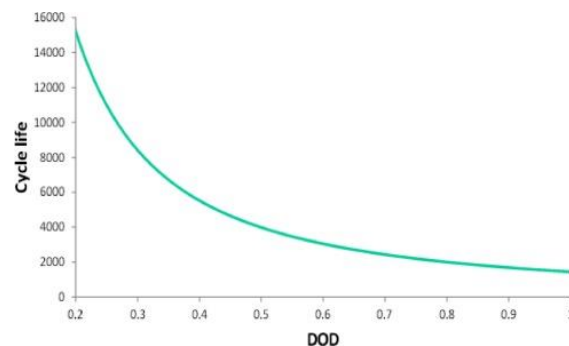
Los parámetros como el estado de carga (SoC), temperatura T , tiempo t , profundidad de descarga DOD , velocidad de descarga y los $amperios \cdot hora$ (Ah) que circulan por la celda aportan para la degradación del acumulador [10]. En la Figura 2.8.b se ve como el SoC y la temperatura afecta a un acumulador que se encuentra en reposo por un largo tiempo. Las sobredescarga como ya se dijo, reducen el número de ciclos que se pueden extraer de un acumulador (Figura.2.8.c), de tal manera que es recomendable no forzar a procesos de descargas profundas.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.8: Factores que afectan la degradación de un acumulador de Ion Litio.
 a) Reducción de la capacidad del acumulador. b, c) Factores que degradan al acumulador.
 Fuente: [10]

Nota: % of the Initial Capacity, % de la Capacidad Inicial; Storage Duration (months), Duracion del Almacenamiento (Meses); Cycle Life, Ciclos de Vida.

2.3 Principios de Funcionamiento de las Baterías de Ion Litio

El proceso de almacenamiento de energía en una celda de Iones de Litio se basa en el proceso químico de intercalación [24]. Este proceso de intercalación consiste en que los Iones de Litio (Li^+) (los cuales tiene una carga previa) son insertados y/o separados de las estructuras moleculares de los electrodos.

En el proceso de carga de estas celdas, el electrodo negativo es eléctricamente reducido, de tal manera que los (Li^+) se insertan (los iones de litio viajan del electrodo positivo al negativo) en las capas individuales del elemento que está formado el ánodo. Por otro lado, el proceso de descarga ocurre exactamente lo contrario, es decir, los (Li^+) abandonan el ánodo para regresar al electrodo positivo. Debido a que la celda está eléctricamente aislada, los electrones deben seguir el camino exterior hacia los colectores de corriente [24]. En la Figura 2.9 se muestra un esquema del proceso carga-descarga en una celda de Iones de Litio.

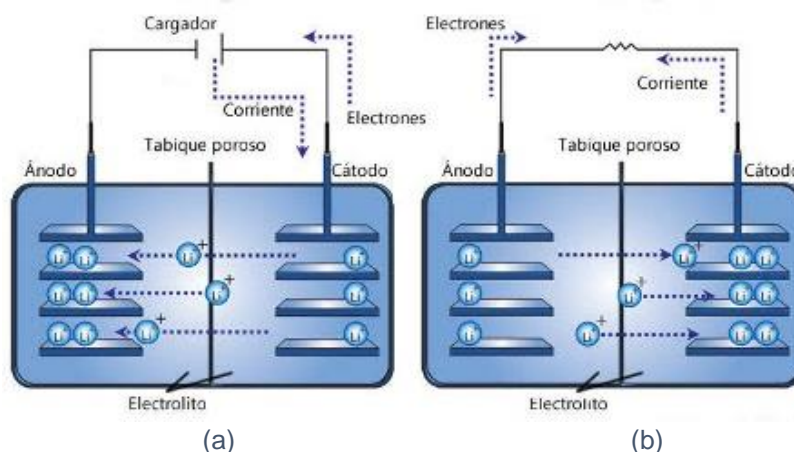


Figura 2.9: Proceso carga-descarga en una celda Ion Litio.

a) Carga. b) Descarga.

Fuente: [19]

El ciclo completo (carga-descarga) no produce cambios en la estructura de los electrodos (solo se mueven los (Li^+)) por lo que las celdas son menos reactivas, más seguras y presentan mayor número de ciclos.

2.4 Polarización en las celdas Ion Litio

En la sección 2.3 se revisó el funcionamiento de las baterías de Ion Litio, las cuales funciona en base a los procesos químico denominados intercalación (iones y electrodos) y "REDOX" (electrones y electrodos). En las reacciones químicas que ocurren en los diferentes procesos ya sean de carga o descarga de este tipo de acumuladores se produce lo que se conoce como cinética de reacción electroquímica, las cuales obedecen a las mismas consideraciones generales de las reacciones químicas. Estas limitaciones cinéticas debidas a las reacciones, producen lo que se conoce como las "Polarizaciones o Caídas de Tensión" que no son otra cosa que la desviación del potencial cuando una corriente eléctrica fluye por los electrodos de la celda.

Los factores que influyen sobre la polarización son el tamaño, forma y composición de los electrodos; la composición de la disolución del electrolito, la temperatura y velocidad de la agitación; el nivel de corriente y el estado físico de las especies químicas que participan en la reacción [25].

El efecto de polarización se divide en tres categorías. Polarización resistiva, polarización de activación y polarización de concentración. En la Figura 2.10 se puede ver cómo afectan estas polarizaciones al voltaje de la celda, debido a la no linealidad de sus componentes.

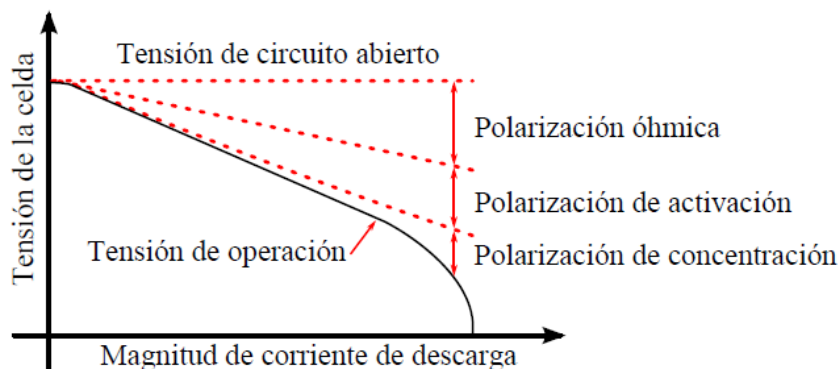


Figura 2.10: Polarizaciones de la celda en función de la magnitud de la corriente.
Fuente: [25]

A continuación, se describe cada uno de los diferentes tipos de polarización que afectan el rendimiento de una celda electroquímica.

- 1) La polarización o caída de tensión resistiva u óhmica se debe a la pérdida de voltaje en los componentes que conforman la celda, (electrolito, diluyentes, materiales de construcción de los electrodos, colectores de corriente de los terminales, la resistencia del contacto entre las partículas del material activo con el diluyente conductor). Esta polarización tarda periodos menores a un microsegundo entre aparecer y desaparecer, por lo que el efecto de polarización resistiva obedece la ley de Ohm entre las partes resistivas de la celda y la corriente.
- 2) La polarización de activación es la pérdida de potencial debida a la velocidad de transferencia de carga y tiene lugar principalmente en la intersección entre los materiales activos y el electrolito. Al estar ligada directamente con la velocidad de transferencia de carga, significa que a mayor magnitud de corriente mayor será la polarización de activación. Este efecto dura entre 10^{-2} y 10^{-4} segundos.



- 3) La polarización de concentración se debe al agotamiento de la capacidad del material activo para el transporte de carga. Esta saturación se da principalmente cuando los mecanismos mediante los cuales se consigue el transporte de carga (la migración, la convección y la difusión) no son los adecuados. La migración de la que se habla es el movimiento de los iones a través de la disolución como resultado de la atracción electrostática entre los electrodos y los iones. La convección es el transporte de iones o de moléculas a través de una disolución como resultado de la agitación, la vibración o los gradientes de temperatura. La difusión es el movimiento de una especie química bajo la influencia de un gradiente de concentración [25]. Debido a que se trata de una saturación, este efecto empieza a pronunciarse después de periodos mayores a las centésimas de segundos.

2.5 Parámetros Característicos del Comportamiento de un Acumulador de Energía

Al ser la celda electroquímica el elemento básico de una batería, los parámetros que se enlistan a continuación se describen para una celda.

- El voltaje de la celda, el cual se determina en los bornes de la misma, varía de 1V a 4 V siendo él V_{min} y V_{max} respectivamente, es importante respetar estos límites para cualquier acción (carga/descarga) ya que de lo contrario la celda puede sufrir daños irreversibles. El voltaje del acumulador depende en forma directa del tipo y cantidad de sustancias reactivas que se encuentran en el interior de la celda.
- Voltaje de Circuito Abierto (VOC), es el voltaje que se mide en los bornes (electrodos) de la celda cuando esta se encuentra sin carga y en reposo.
- La capacidad, de símbolo C , es la cantidad de reactivos que contiene el acumulador. Esta representa la cantidad de corriente que puede entregar la celda durante un tiempo determinado, por lo que sus unidades son *amperios · hora* (Ah).
- El estado de carga (SoC) es la capacidad disponible referida a la capacidad nominal de la celda, se expresa en porcentaje, el 100% será cuando la celda está completamente cargada y 0% cuando esta descargada. En la ecuación 2.1 se presenta la ecuación del SoC de un acumulador.



$$SoC (\%) = \frac{C_{actual}(Ah)}{C_n(Ah)} * 100 \quad (2.1)$$

- La corriente de autodescarga, con la cual disminuye una pequeña cantidad de la energía del acumulador (esta disminución se debe a que la celda sufre una descarga cuando no está en funcionamiento).
- El rendimiento, el cual nunca será un valor ideal del 100% ya que depende en forma directa de la eficiencia energética que a su vez abarca las pérdidas debido a la autodecarga, a la resistencia interna o a la velocidad de descarga.
- Los ciclos de vida, hace referencia al número de cargas-descargas que puede soportar la celda hasta que la capacidad de la misma sea del 80% de su valor nominal [9].
- La resistencia interna, es la oposición al paso de la corriente eléctrica provocado por los materiales que forman parte de la constitución física del acumulador, es por eso que estas resistencias se clasifican en resistencia óhmica y resistencia de polarización.

R_{ohmica} : Esta resistencia es la que aparece en los electrodos, electrolito y en la frontera entre ellos, cuando esta resistencia es mayor, menor será el voltaje en el acumulador, menor tiempo de descarga y menor potencia disponible.

$R_{polarizacion}$: Depende directamente de la polarización química y de la concentración del electrolito.

Las principales características que describen a un acumulador en forma más general son la cantidad de energía que puede almacenar, la máxima corriente de descarga y la profundidad de descarga que puede sostener.

- La cantidad de energía, es aquella cantidad de energía que puede ser sostenida por un acumulador y que se representa como *watt – hora Wh*, en donde el número de *Wh* se determina al multiplicar el voltaje nominal de la celda por la capacidad de descarga en régimen permanente (*Ah*) de la celda.



- La corriente máxima, es la capacidad que tiene la celda al sostener una corriente de descarga en régimen permanente. El número de Ah se deriva de un régimen de descarga especificado por el fabricante. Es preciso indicar que no se debe intentar tener una corriente mayor a la nominal, ya que se acelera el proceso electroquímico provocando de esta manera que se incremente la resistencia interna de la celda, el voltaje de salida disminuye, autolimitando la capacidad de sostener corrientes elevadas en la carga [8]. El caso contrario es válido, es decir es permitido una corriente de descarga menor a la nominal.
- La profundidad de descarga de una celda es la capacidad que puede extraerse de la misma referida a su capacidad nominal, este valor esta dado en forma porcentual, por la ecuación 2.2.

$$DOD (\%) = \frac{C_{descargado}(Ah)}{C_n(Ah)} * 100 \quad (2.2)$$



CAPÍTULO 3: CAMPOS DE ANÁLISIS DE LOS ACUMULADORES DE ION LITIO Y PROCEDIMIENTOS DEL MODELADO EN EL CAMPO ELÉCTRICO

La reaparición del vehículo eléctrico a traído consigo investigaciones más profundas y precisas en todos sus campos, entre ellos el sistema de almacenamiento que además de mejorar su química para almacenar mayor cantidad de energía por el mismo peso del material, ha sido necesario desarrollar modelos que permitan simular el comportamiento de los acumuladores y así poder predecir sus características futuras a partir de datos actuales, de esta forma también se puede predecir el funcionamiento del sistema acumulador cuando este bien pueda ser aplicado en sistemas más grandes como lo son los vehículos eléctrico. En este capítulo se revisan los posibles campos de investigación para los modelados de los acumuladores de Ion Litio y las diferentes formas de extracción de los parámetros de los modelos eléctricos que es el que se aplicará en este trabajo de investigación.

3.1 Definición y Clasificación de los Modelos

Por modelo de acumulador de energía se conoce al conjunto de valores matemáticos que representan los parámetros que reproducen el comportamiento de un elemento (en este caso acumuladores de Ion Litio), los cuales están dispuestos en forma tal que en conjunto describan el comportamiento de todo el sistema acumulador partiendo de datos conocidos, siendo estos las entradas del modelo.

Todos los modelos llevan asociados un cierto grado de exactitud que determinará su éxito o fracaso en el intento reproducir el comportamiento del sistema real definido matemática en el modelo. Dependiendo del sistema real a modelar, se puede obtener modelos sencillos o complejos, la complejidad depende de la cantidad de parámetros que se incorporen al modelo y de las características propias del sistema real [26].

Los acumuladores de energía eléctrica son dispositivos electroquímicos, lo que implica que este sistema puede ser analizado para su modelado ya sea desde el campo eléctrico o químico, aunque también hay un tercer campo de investigación que es el matemático. En la literatura científica se puede conseguir una variedad de procesos y modelos dirigidos al análisis de las celdas de Ion Litio, todos estos analizados desde el punto de vista de cualquiera de los campos ya mencionados.



3.2 Modelos del Campo Eléctrico

Los modelos desarrollados en el campo eléctrico son los denominados circuitos equivalentes, en base a las características dinámicas y los principios de funcionamiento del acumulador, el modelo de circuito equivalente consta de elementos eléctricos como resistencias, bobinas, condensadores y fuentes de tensión, en donde cada elemento tiene una función específica para reproducir el comportamiento real del acumulador.

Según [27] se puede decir que los modelos de circuitos equivalentes cumplen con una característica importante entre exactitud y usabilidad, ya que presenta resultados muy cercanos a los exactos siendo este un modelo de fácil ejecución ya que no requiere un alto grado computacional para sus cálculos, esta característica hace que este tipo de modelos sean muy utilizados en multitud de aplicaciones de diseño, cálculo y simulación de sistemas de almacenamiento.

3.3 Modelos del Campo Químico

Estos modelos que parten del desarrollo en el campo químico, basan su funcionamiento en las características constructivas y de los efectos electroquímicos que se generan en el interior de la celda electroquímica en funcionamiento, estos modelos tienen la capacidad de reproducir el comportamiento de la celda estudiada de forma más exacta que otro tipo de modelados, una de las características favorables de este tipo de modelados es que tienen la capacidad de calcular el balance de energía que tiene lugar en el acumulador, tanto la energía acumulada como la proporcionada.

El inconveniente que hace que este tipo de modelos sea limitado en cuanto a su aplicación, es que son complejos y requieren una alta carga computacional, razón por la cual necesitan periodos largos de cálculos en la simulación ya que según [28] este tipo de modelos necesitan ecuaciones diferenciales parciales para reproducir el comportamiento de la celda. En estos modelos se presenta el inconveniente de que no son capaces de proporcionar detalles acerca del efecto de la temperatura o del envejecimiento del acumulador, no aportan detalle de las variaciones que se producen en el voltaje de salida durante la carga de la batería, lo cual es una información muy valiosa para la correcta integración de la batería en el sistema [29].

3.4 Modelos Matemáticos

En la literatura científica se han encontrado otros campos de modelados de acumuladores como son los modelos matemáticos, según [28] este tipo de modelos no ofrecen ninguna información de corriente y voltaje que sea importante para la simulación y optimización de circuitos. Este tipo de modelos matemáticos solo funcionan para aplicaciones específicas y en la mayoría de los casos proporcionan resultados inexactos

(en el orden del 5% al 20% de error), por lo general hacen uso de fórmulas empíricas para modelar alguna característica específica del acumulador.

Entre los modelos matemáticos se pueden enlistar los basados en técnicas de los modelados heurísticos y estadísticos, la primera técnica se basa en la ecuación de Peukert, esta ecuación es usada para modelar la capacidad de la batería en función de la carga o descarga del acumulador, también se puede modelar la eficiencia de la batería analizando el tiempo de vida de ésta, en función del perfil de corriente que define la carga o la descarga [29]. La segunda técnica implica el análisis estadístico de los valores obtenidos del sistema, basando su lógica en cadenas de Markov, se puede valorar los cambios que en él se producen, los cuales dan lugar a resultados aleatorios más o menos probables, de tal forma que la probabilidad de que se produzca un suceso depende directamente del suceso anterior. La técnica del modelo matemático para los sistemas acumuladores de energía eléctrica son modelos más intuitivos, pero menos descriptivos y precisos, lo que limita su aplicación.

Al momento de elegir el tipo de modelo a estudiar, depende directamente del conocimiento que se tiene en un tipo de campo, herramientas analíticas, herramientas experimentales, etc. Sin embargo, se debe tener en cuenta el grado de precisión que se desea tener en la predicción del comportamiento futuro del acumulador, así como del nivel computacional disponible para el análisis, teniendo en cuenta que siempre que se desee tener mayor precisión en la predicción incrementará la complejidad del cálculo, lo que a su vez implica mayor peso computacional y menor eficiencia en los cálculos.

En este trabajo de investigación se opta por los modelos eléctricos, ya que tiene como objetivo principal el modelo de baterías de Ion Litio y su aplicación en vehículos eléctricos, esto implica que los modelos de las acumuladores a analizar deben ser vistos desde un punto de vista eléctrico para su posterior análisis en el sistema completo del vehículo eléctrico, además de que se sabe que en este tipo de sistema es conveniente un control de los parámetros a tiempo real, lo que implica que las señales a controlar deben ser tomadas mientras el sistema está en funcionamiento para lo cual será impredecible una gran rapidez de cálculo y por tanto una eficiencia computacional óptima.

3.5 Análisis de los Procedimientos del Modelado en el Campo Eléctrico

Los distintos artículos que se centran en la investigación de los modelados de acumuladores de Ion Litio desde el punto de vista eléctrico, presentan esquemas eléctricos en los cuales sus parámetros (componentes) no son evidentes de forma directa, para poder obtener estos parámetros se deben llevar a cabo procedimientos experimentales al elemento acumulador de energía, estos procedimientos se clasifican en dos grupos que son en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

3.5.1 Técnicas de modelado en el dominio del tiempo

Las técnicas de modelado en el dominio del tiempo más empleadas para el modelado de un acumulador son: las pruebas de potencia constante, interrupción de corriente y la voltamperometría cíclica.

3.5.1.1 Potencia Constante

Con la técnica de potencia constante lo que se desea calcular es la potencia específica y energía específica del acumulador de energía, esta técnica consiste en descargar al elemento acumulador con una corriente y tensión constantes, logrando de esta manera calcular la potencia y la energía en función de la corriente descarga (rapidez). Por medio de las ecuaciones 3.1 y 3.2 se logra calcular la energía específica y potencia específica respectivamente, una vez que se haya descargado el acumulador en un tiempo t (segundos).

$$E_s = \frac{E}{M} = \frac{V \cdot I \cdot t}{3600 \cdot M} \left(\frac{Wh}{kg} \right) \quad (3.1)$$

$$P_s = \frac{P}{M} = \frac{V \cdot I}{3600 \cdot M} \left(\frac{Wh}{kg} \right) \quad (3.2)$$

- V : Voltaje de descarga del acumulador
- I : Corriente de descarga
- t : Tiempo de descarga
- M : Masa del acumulador

Dependiendo del modelo de circuito equivalente analizado, se emplea este método de obtención de los parámetros, que en cierta manera resulta ser algo limitado ya que lo que se obtiene de forma directa es solo la potencia y energía específica del acumulador.

3.5.1.2 Interrupción de Corriente

La técnica de interrupción de corriente o corriente variable, es la técnica que más se emplea cuando de determinar los elementos pasivos del circuito equivalente que representa el acumulador de energía se refiere. El procedimiento experimental para realizar esta técnica consiste en aplicar un solo pulso de corriente (sea de carga o de descarga) o una sucesión de ellos al acumulador, estos pulsos son muy útiles para

realizar la valoración del efecto de polarización del acumulador analizado, obtener la relación del voltaje de circuito abierto (VOC) con respecto al estado de carga (SoC) del acumulador y también permite determinar la resistencia interna que presenta el acumulador, el rango de aplicación de estos pulsos se realiza en el establecido por el SoC del acumulador, es decir se tiene que respetar los voltajes límites establecidos como voltaje máximo de carga y voltaje mínimo de descarga (V_{max} ; V_{min}).

Al momento en que se interrumpe el escalón de corriente aplicado, se produce un incremento (proceso de descarga) o una disminución (proceso de carga) instantáneo de la tensión terminal del acumulador, luego de pasar un corto tiempo de reposo este incremento o disminución del voltaje terminal del acumulador continua de forma no lineal hasta alcanzar el nivel en la que se la denomina voltaje de circuito abierto, es decir un valor estable del voltaje. Estas dinámicas en la respuesta del acumulador a los escalones de corriente aplicados al mismo se pueden ver en la Figura 3.1.

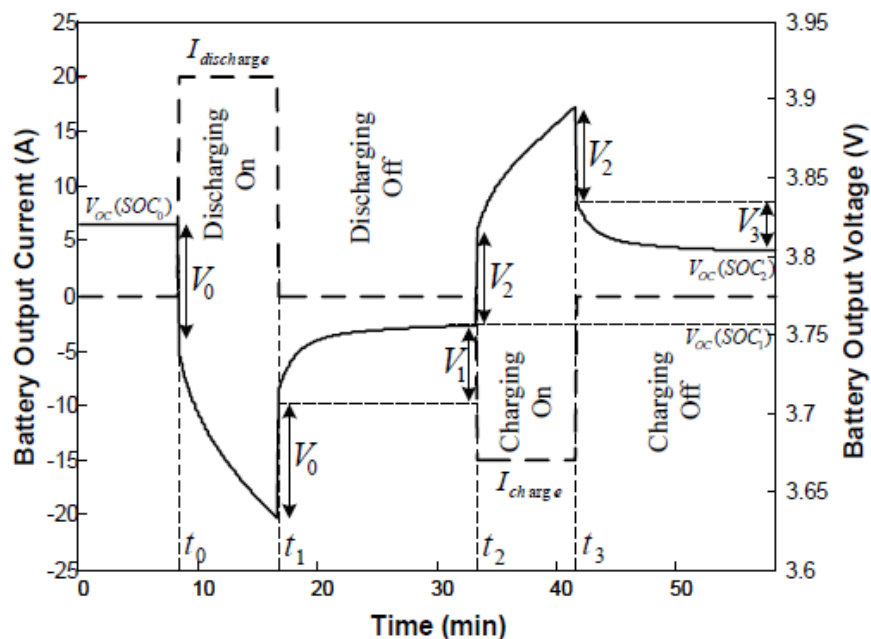


Figura 3.1: Dinámica de la respuesta del acumulador a escalones de corriente.

Fuente: [30]

Nota: Battery Output Current (A), Corriente de Salida de la Batería (A); Time (min), Tiempo (min); Battery Output Voltage (A), Voltaje de Salida de la Batería (A); Discharging On, Descargando; Charging On, Cargando; $I_{discharge}$, $I_{descarga}$; I_{charge} , I_{carga} .

En la Figura 3.2, se presenta el perfil de un escalón de corriente en el caso de descarga.

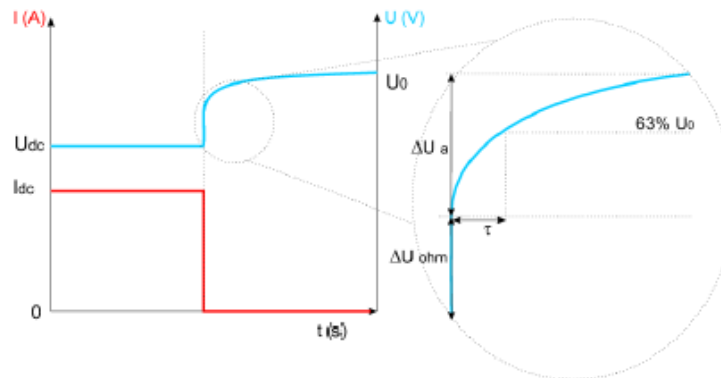


Figura 3.2: Interrupción de un escalón de corriente en descarga.

Fuente: [24]

Analizando la Figura 3.2 se puede realizar el proceso de obtención de los elementos del circuito equivalente que representa el acumulador de energía analizado, el comportamiento vertical del voltaje representa la caída de tensión en la resistencia R_s que representa la resistencia interna del acumulador, el comportamiento no lineal de la tensión se aproxima a un condensador conectado en paralelo con una resistencia, donde esta red RC se caracteriza por la constante de tiempo (τ), con las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5, se pueden determinar los valores de R_s , R y C .

$$R_s = \frac{\Delta U_{ohm}}{I_{dc}} \quad (3.3)$$

$$R = \frac{\Delta U_a}{I_{dc}} \quad (3.4)$$

$$C = \frac{\tau}{R} \quad (3.5)$$

La forma de reproducir el comportamiento activo del acumulador de energía, el circuito equivalente debe necesariamente incluir un elemento activo, para ello se agrega una fuente de tensión interna (E). El circuito equivalente queda entonces como se ilustra en la Figura 3.3, este es un método que sirve para analizar modelos de circuitos equivalentes específicos, los cuales tienen la forma básica o parten desde el modelo básico de Thévenin.

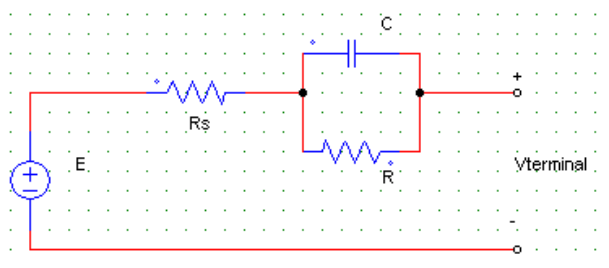


Figura 3.3: Circuito equivalente al sistema acumulador de energía.

Esta técnica es fácil de implementar, pero tiene la desventaja de que el modelo no es lo suficientemente exacto (errores en el cálculo de los elementos del circuito equivalente) debido a que este modelo depende de la correcta identificación del punto de transición (punto en el cual cambia de la tendencia vertical a no lineal) de la tensión.

3.5.1.3 Voltamperometría Cíclica

Es una de las técnicas más utilizadas para el estudio del comportamiento de una reacción "REDOX" de una especie química. Esta técnica en el caso de parametrización de un acumulador, permite conocer la simetría que existe entre los procesos de carga y de descarga, con el objetivo de determinar los límites de tensión de una celda electroquímica.

Esta técnica consiste en aplicar un barrido de tensión en forma de señal triangular (Figura 3.4) la cual variará de un nivel de tensión E_0 a E_f , cambiando de sentido una vez que se haya alcanzado el este último valor de tensión, este proceso de barrido se puede repetir las veces que se crea necesario para el experimento.

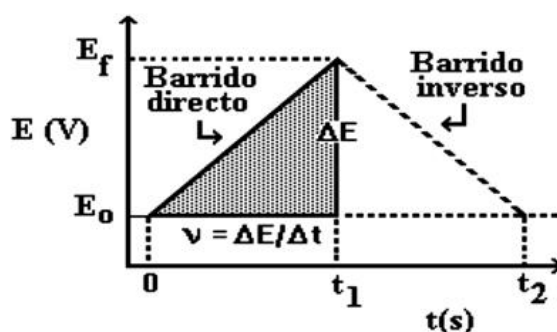


Figura 3.4: Señal de excitación en una voltamperometría cíclica.

Fuente: [26]

La respuesta a la señal de excitación se llama voltamperograma cíclico y se obtiene al graficar la corriente medida a la tensión asociada en una curva $E = (i)$ (Figura 3.5).

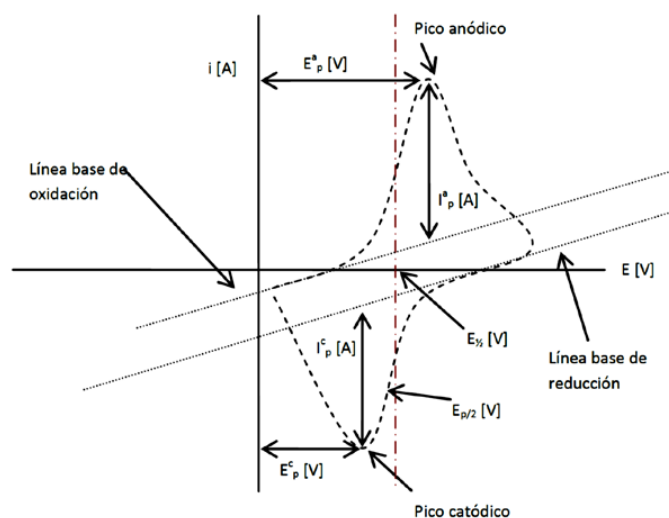


Figura 3.5: Resultado voltamperometría cíclica
Fuente: [26]

Esta técnica se aplica frecuentemente en el estudio de las reacciones reversibles, como es el caso de las reacciones químicas que ocurren en el interior de una celda de Iones de Litio. Sin embargo, su campo de utilización se ve limitado a la obtención de parámetros para modelos electroquímicos, no teniendo utilidad a la hora de definir algún parámetro en circuitos eléctricos equivalentes [26].

3.5.2 Técnicas de modelado en el dominio de la frecuencia

Las técnicas con mayor aplicación en el dominio de la frecuencia para el modelado de un sistema acumulador de energía son: el análisis de frecuencia en estado estacionario y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

3.5.2.1 Análisis de Frecuencia en Estado Estacionario

Es la respuesta de un sistema en estado estacionario o régimen permanente ante una entrada sinusoidal, este método se basa en que si a un sistema lineal invariante en el tiempo se le aplica una señal de entrada con una frecuencia (f), la salida en estado estacionario también será una señal sinusoidal de la misma frecuencia con diferente magnitud y ángulo de fase [24]. El modelado del sistema es a través de una función de transferencia que relaciona la función de entrada con la función de salida poniendo las condiciones iniciales igual a cero. A partir de esa ecuación y utilizando como entrada la corriente y como salida la tensión, se puede calcular la impedancia del sistema. Este es un procedimiento para modelar sistemas lineales, por lo que desde un principio lo hace

inadecuado para modelar acumuladores de energía ya que estos son sistemas no lineales.

3.5.2.2 Espectroscopía de la Impedancia Electroquímica (EIS)

Es una técnica en el dominio de la frecuencia (para un intervalo dado) ampliamente utilizada para determinar los parámetros de la impedancia que forma parte del circuito equivalente que reproduce el comportamiento de los acumuladores de energía. Esta técnica consiste en aplicar una señal de excitación de amplitud pequeña al sistema, de tal manera que genera una señal de respuesta también de pequeña amplitud, facilitando el cálculo de la impedancia ya que este cálculo se realiza en el comportamiento lineal de la señal de salida (Figura 3.6).

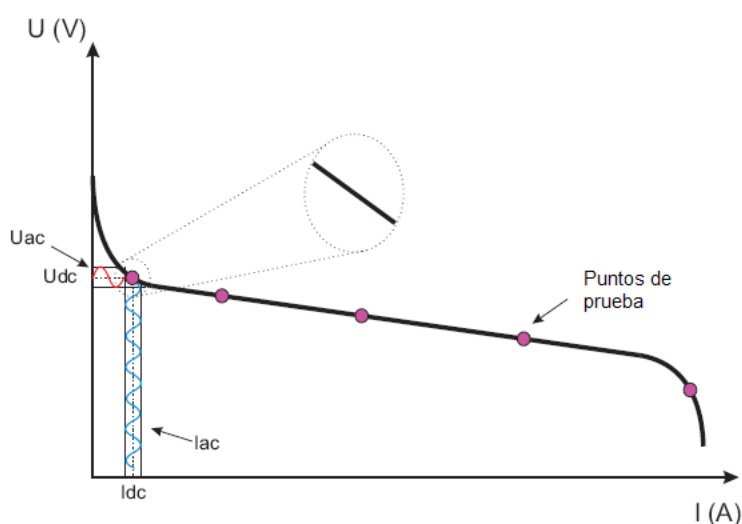


Figura 3.6: Prueba de EIS.
Fuente: [24]

Las señales de excitación correspondientes para la prueba de espectroscopía de la impedancia del elemento acumulador pueden ser de corriente o de tensión.

Para realizar el proceso de espectroscopía se suele utilizar analizadores de impedancia comerciales, estos equipos incorporan el sistema de generación de señales, captura de señales y además calculan en cada punto de prueba la impedancia. En la Figura 3.7 se puede ver un analizador comercial de la marca Hioko.



Figura 3.7 Analizador de impedancia im7580 Hioko.
Fuente: [31]

La impedancia del circuito equivalente en cada punto de prueba se calcula como la relación entre la tensión y la corriente. Así por la definición de impedancia eléctrica (Z) se puede calcular el módulo y el argumento de la impedancia que presenta el acumulador de energía a una determinada frecuencia como se puede ver en la ecuación 3.6.

$$Z = \frac{E}{I} = \frac{E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)}{I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)} = Z' + Z'' \quad (3.6)$$

La impedancia obtenida es posible analizarla al representarla en forma gráfica por cualquiera de los dos métodos enlistados a continuación:

Diagrama de Nyquist: Es el método más utilizado, la información que se obtiene de este son los componentes del circuito equivalente los cuales se desprenden del comportamiento espectral que adopta la gráfica.

Diagramas de Bode: La información que se puede obtener de este tipo de representación es el comportamiento de la impedancia en función de la frecuencia.

De los dos métodos presentados, el más eficiente y de mayor aplicación para determinar los parámetros del circuito equivalente es el diagrama de Nyquist, pero para su aplicación se debe conocer como cada uno de los elementos se representa en el mismo:

- Una resistencia ideal (sin parte imaginaria) le corresponde a un punto en el eje horizontal (Z').
- Un condensador ideal se representa mediante una línea vertical en la parte superior del eje vertical (porque corresponde a una impedancia imaginaria negativa).
- Una inductancia pura se grafica como una línea vertical en la parte inferior del eje imaginario (Z'').

En la Figura 3.8 se puede ver como se representa en el diagrama de Nyquist los elementos pasivos eléctricos.

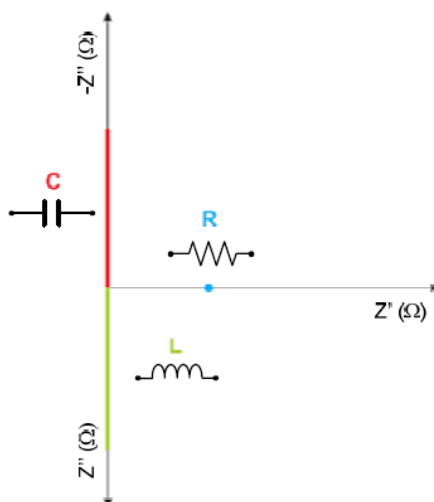


Figura 3.8: Representación de R, L y C en el diagrama de Nyquist.
Fuente [24]

En aplicaciones reales no existen elementos ideales, es decir siempre se obtiene combinaciones entre elementos resistivos y capacitivos o inductivos, dependiendo del caso. Es por ello que lo común es obtener curvas de Diagramas de Nyquist como las que se muestran a continuación en la Figura 3.9:

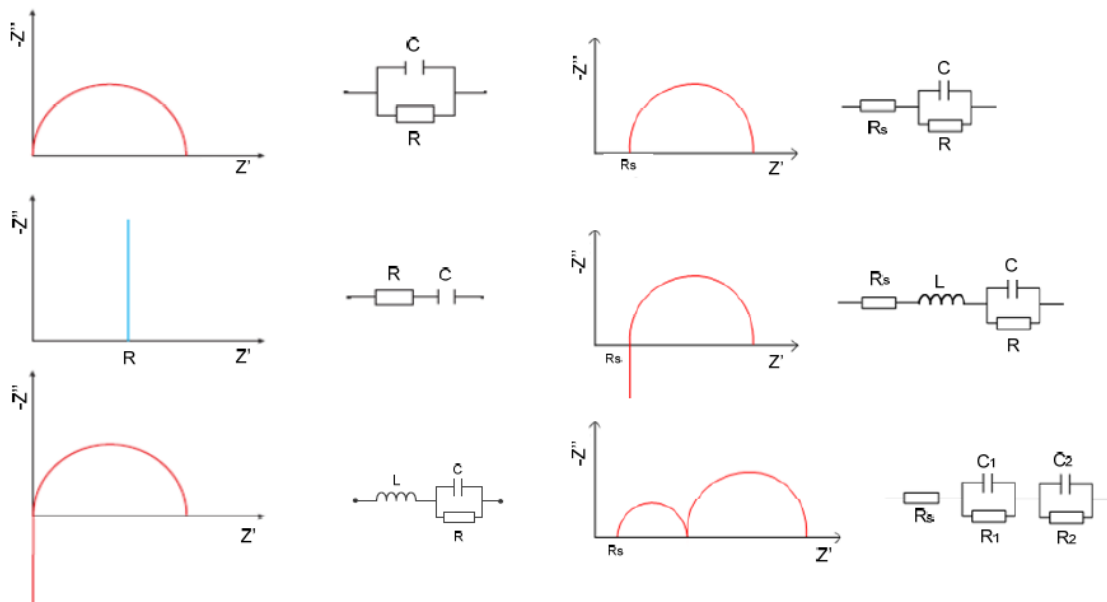


Figura 3.9: Representación de circuitos en el diagrama de Nyquist.
Fuente: [24]

En la Figura 3.10 se puede ver un diagrama de Nyquist, con un barrido de frecuencia entre 10mHz y 10kHz, marcando como puntos destacados 1Hz y 1kHz. A partir de los

valores obtenidos de este gráfico es posible construir un modelo para simular el comportamiento del acumulador en estudio [26].

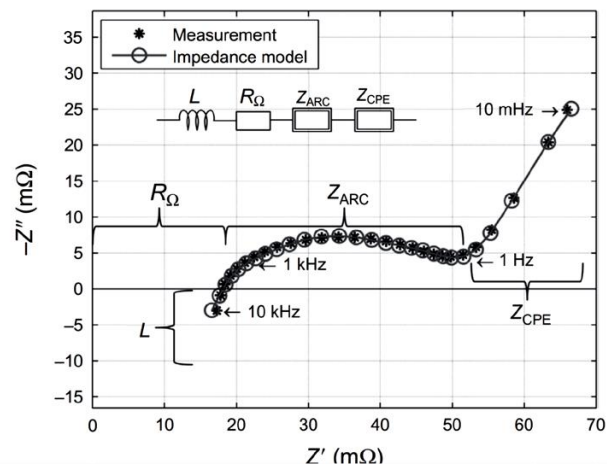


Figura 3.10: Diagrama de Nyquist.
Fuente: [26]

Nota: Measurement, Medición; Impedance Model, Modelo de Impedancia.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE ACUMULADORES DE ION LITIO DESDE EL PUNTO DE VISTA ELÉCTRICO

En los diversos artículos científicos dirigidos al modelado de acumuladores de energía eléctrica basados en la química de Ion Litio, se puede evidenciar que la mayoría de ellos se centran en el modelado de solo una de las celdas ([28] [32] [33]). Los modelos presentan diferentes niveles de dificultad, todo esto depende del grado de precisión que se pretende obtener en cuanto a la reproducción del comportamiento del acumulador se refiere. A continuación, se describen diferentes modelos encontrados en la literatura científica, el orden de presentación se hace según el grado de dificultad y precisión que presentan los modelos analizados.

4.1 Modelo Equivalente de Resistencia Interna (R_{int})

El modelo más sencillo para la representación de un acumulador (sin importar del tipo de material del que este fabricado) que se puede hallar en la literatura científica, es el circuito equivalente (Figura 4.1) que consta de una fuente de tensión ideal U_{oc} que representa el voltaje de circuito abierto del acumulador y una resistencia en serie R_o para reproducir la caída de voltaje dentro del acumulador (en su resistencia interna) cuando circula una corriente I_L por ella, esta corriente puede ser de carga (negativa) o de descarga (positiva). El valor de U_L es el valor del voltaje que tendrá el acumulador en sus terminales sin importar su estado actual (carga-descarga).

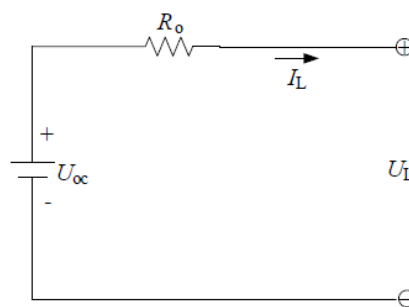


Figura 4.1: Modelo Equivalente R_{int} .
Fuente: [32]

La ecuación 4.1 describe el comportamiento del circuito equivalente de resistencia interna.

$$U_L = U_{oc} - I_L * R_o \quad (4.1)$$

Los elementos que conforman este circuito equivalente (R_o), podrían o no estar en función del estado de carga (Charge of State (SoC)), estado de salud (Health of State (SoH)) y de la temperatura del acumulador [32]. Sin embargo en la mayoría de los modelados, estos elementos dependen solo de la variable independiente (SoC).

4.2 Modelo Equivalente de Thévenin

Este es un modelo que ha tenido mucha acogida por su simplicidad y precisión, de tal manera que hay una variedad de artículos científicos que lo han adoptado para representar el comportamiento de diferentes tecnologías de acumuladores.

Este es un modelo que parte del modelo básico (R_{int}), al incorporar una red RC (R_{Th}/C_{Th}) en serie con la resistencia interna R_o del modelo (R_{int}) (Figura 4.2), este nuevo circuito equivalente puede describir el comportamiento dinámico del acumulador.

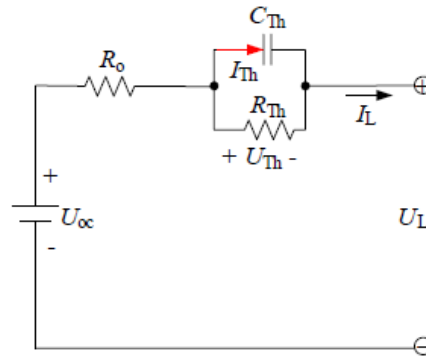


Figura 4.2: Modelo Equivalente de Thévenin.
Fuente: [32]

En el modelo de Thévenin la fuente de tensión U_{OC} representa la voltaje en circuito abierto, R_o la resistencia óhmica y la red RC en donde la resistencia R_{Th} representa el efecto de polarización y la capacitancia C_{Th} la respuesta transitoria en el proceso de carga y descarga del acumulador.

La ecuación 4.2 y 4.3 describen el comportamiento eléctrico del circuito equivalente del modelo de Thévenin.

$$\dot{U}_{RC} = \dot{U}_{Th} = -\frac{U_{RC}}{R_{Th} \cdot C_{Th}} + \frac{I_L}{C_{Th}} \quad (4.2)$$

$$U_L = U_{oc} - I_L \cdot R_o - U_{RC} \quad (4.3)$$

En donde U_{RC} es el voltaje en la red RC .

Entre los artículos que han empleado el modelo de Thévenin para representar el comportamiento de una celda de “Polímero de Ion Litio” está el trabajo presentado en [33], en donde se realiza la parametrización y modelado de una celda comercial (Kokam SLBP), lo particular de este estudio es que los elementos del circuito equivalente a excepción de la fuente de tensión que representa el voltaje en circuito abierto son constantes y no varían en función del (*SoC*) del acumulador. Las especificaciones de la celda modelada se presentan en la tabla 4.1. Según las conclusiones presentadas en este estudio, se obtiene un error máximo y promedio del 3% y 0,422% respectivamente, en los resultados experimentales con respecto a los resultados obtenidos de la simulación del modelo.

Tabla 4.1: Datos técnicos de la celda modelada en [33].
Fuente: [33]

Parámetro	Valor
Capacidad	11Ah
Voltaje nominal	3,7V
Voltaje límite de carga	4,2V
Voltaje límite de descarga	2,7 V
Corriente de carga máxima continua	33A
Corriente de descarga máxima continua	88A
Impedancia inicial	1,6Ω
Ciclos de vida	1400 <i>ciclos</i>

La parametrización de los elementos del circuito equivalente en el estudio presentado en [33] se realiza a partir del procedimiento experimental de descarga completa del acumulador con una corriente constante, en el trabajo, primero se carga la celda hasta que alcanza su corriente de corte de 0,05C según las especificaciones del fabricante, luego se realiza la descarga con una corriente constante de 1C (11A) haciendo uso de una carga programable hasta llegar al voltaje de corte de 2,7V (Figura 4.3).

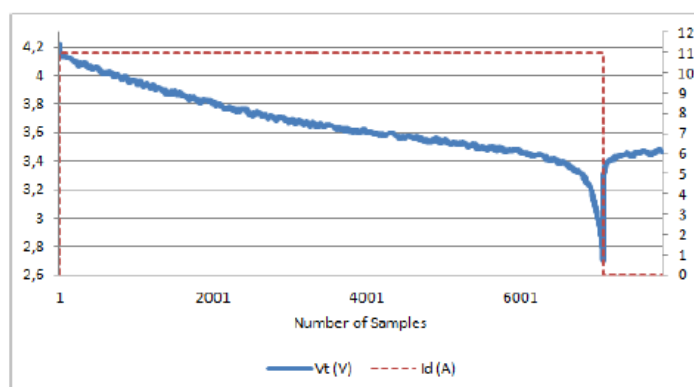


Figura 4.3: Curva de descarga de la celda Kokam SLBP en [33].
Fuente: [33]

Nota: Number of Samples, Número de Muestras; $V_t(V)$, Voltaje terminal (V); $I_d(A)$, Corriente de descarga.

Según el autor de [33], la caída del voltaje instantáneo es causada por la resistencia interna R_o , por lo que el valor de esta resistencia se obtiene directamente con la ley de Ohm (ecuación 4.4), siendo el ΔU la variación instantánea del voltaje e I_L la corriente de descarga.

$$R_o = \frac{\Delta U}{I_L} \quad (4.4)$$

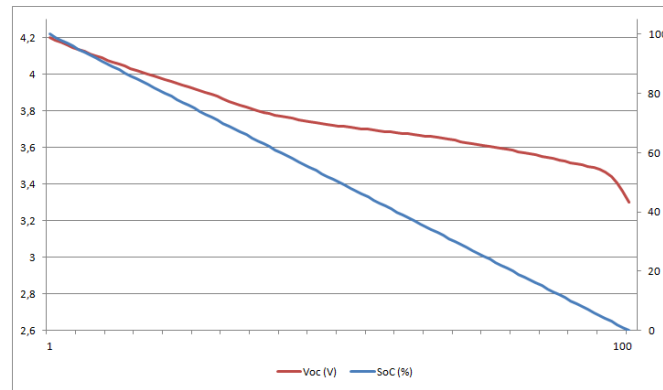
Por su parte los parámetros de la red RC en [33] se calculan con respecto al tiempo que le lleva a la batería alcanzar el potencial de equilibrio una vez que la carga se desconecta, con la inclusión de la constante de tiempo, el modelo es capaz de simular el efecto del proceso de difusión y transferencia de carga entre los electrodos y el electrolito [33]. Las ecuaciones 4.5 y 4.6 se utilizan para el calcula los elementos de la red RC.

$$\tau = R_t * C_t \quad (4.5)$$

$$R_t = \frac{V_{OC} - V_t'}{I_L} \quad (4.6)$$

V_{OC} corresponde a la tensión de circuito abierto una vez que la celda ha alcanzado su tensión de equilibrio; V_t' es el valor de la tensión en las terminales de la celda justo antes que comience el proceso de relajación.

Para la parametrización de la fuente de tensión VOC que representa el valor del voltaje en las terminales de la celda cuando esta se encuentra sin carga, en [33] se calcula mediante una función matemática durante el tiempo de ejecución, es decir, se lleva a cabo un proceso de descarga controlado para determinar la relación no lineal que existe entre el voltaje de circuito abierto (VOC) y el estado de carga (SoC). Este proceso se lleva a cabo con impulsos de corriente de descarga de 11A durante 36 seg, (corresponde al 1% de capacidad de la batería), luego se mide el voltaje de equilibrio en circuito abierto. El proceso se repite hasta que la batería alcanza su voltaje de corte ($V_t = 2,7 V$). La relación no lineal resultante entre SoC y VOC se puede ver en la Figura 4.4 que se trazó con datos experimentales obtenidos a partir del procedimiento de prueba de descarga en [33].

Figura 4.4: Relación del VOC – SoC .

Fuente: [33]

Nota: $Voc(V)$, Voltaje de Circuito Abierto; $SoC(\%)$ Estado de Carga (%).

Haciendo uso de la técnica del ajuste de curvas en estos puntos de datos conocidos en el artículo, VOC se pudo definir como una función exponencial de SoC , como se puede ver en la ecuación 4.7 [33].

$$VOC = -1,035 * e^{-35*SoC} + 0,315 * SoC^3 - 0,075 * SoC^2 + 0,495 * SoC + 3,575 \quad (4.7)$$

En la Figura 4.5 se puede ver que el modelo de Thévenin de la celda estudiada en [33] se ha simulado en Simulink, en donde como ya se dijo que la fuente de tensión (VOC) se representa como una fuente de tensión controlada que depende del estado de carga (SoC) del acumulador, la cual a su vez depende directamente de la corriente (carga o descarga) aplicada al acumulador.

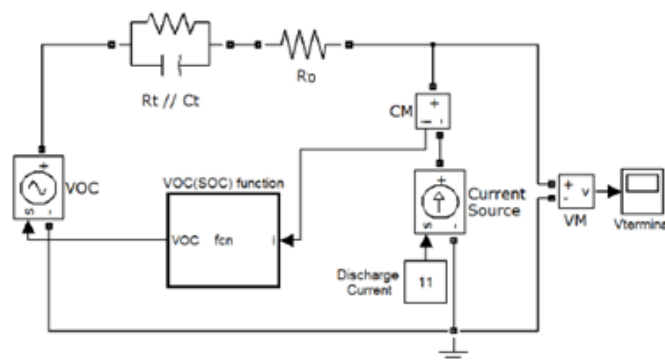


Figura 4.5: Simulación del sistema propuesto en [33].

Fuente: [33]

Nota: Current Source, Fuente de Corriente; Discharge Current, Corriente de Descarga; VOC(SOC) function, Función para el Cálculo del SoC .

4.3 Modelo PNGV

Este modelo fue propuesto por “Partnership for a New Generation of Vehicles”, que fue un programa de cooperación entre el gobierno de los USA y las principales corporaciones de automóviles como DaimlerChrysler, Ford Motor Company y General Motors Corporation. Los investigadores de la asociación lograron identificar formas para que los vehículos alcancen 80MPG el cual fue su objetivo principal, pero también lograron la combinación de motores de gasolina y eléctricos, así como la implementación el frenado regenerativo. En la Figura 4.6 se presenta el esquema eléctrico del modelo propuesto por PNGV.

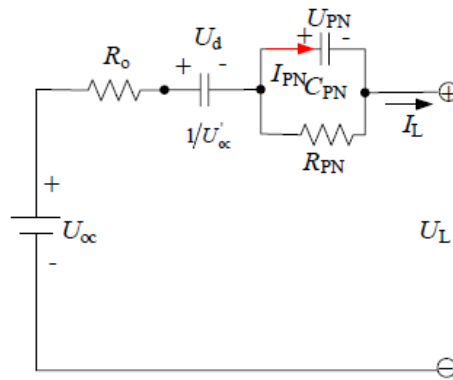


Figura 4.6: Esquema del modelo PNGV.
Fuente: [32]

El modelo que reproduce el comportamiento de un acumulador propuesto por PNGV parte del modelo de Thévenin, la diferencia radica cuando se incorpora un condensador de valor de $1/U'_{oc}$ en serie entre la resistencia óhmica y la red RC. La función del condensador adicional es reproducir el cambio del voltaje de circuito abierto generado durante los diferentes perfiles de carga & descarga del acumulador [32]. Según [26] el modelo PNGV es uno de los más utilizados en el diseño automotriz en la industria norteamericana.

Las ecuaciones 4.8, 4.9 y 4.10 que se muestran a continuación expresan el comportamiento eléctrico del modelo PNGV.

$$U'_d = U'_{oc} * I_L \quad (4.8)$$

$$U'_{PN} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} * C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \quad (4.9)$$

$$U_L = U_{OC} - U_d - U_{PN} - I_L * R_o \quad (4.10)$$

Donde U_d es el voltaje en el capacitor de valor $1/U'_{oc}$, por su parte U_{PN} es el voltaje en la red RC.

4.4 Modelo de Polarización Dual

Este es un modelo que parte del análisis de las curvas características de un acumulador, en las cuales se evidencian un efecto de polarización bastante claro, si bien es cierto que con el modelo de Thévenin se podría conseguir una aproximación bastante buena en cuanto a la reproducción del efecto de polarización se refiere, con el modelo de Polarización Dual se puede tener mayor precisión ya que este parte del modelo de Thévenin con la ventaja que posee una red RC adicional, con la red RC adicional aumenta la precisión en cuanto a la reproducción del efecto de polarización del acumulador.

El modelo de Polarización Dual o Doble Polarización esquematizado en la Figura 4.7, consta de una fuente tensión que representa la tensión de circuito abierto, resistencias internas tales como R_o que representa la resistencia óhmica del acumulador, las resistencias de polarización R_{pa} y R_{pc} que representan la resistencia efectiva que caracteriza la polarización de activación y la resistencia efectiva que caracteriza la polarización de concentración en forma respectiva, en cuanto a los condensadores C_{pa} y C_{pc} que se presentan en el modelo, sirven para representar la respuesta transitoria durante la transferencia de potencia así como para describir la polarización activación y la polarización de concentración en forma individual.

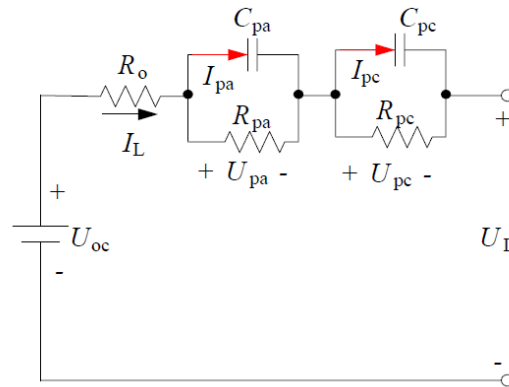


Figura 4.7: Modelo de Polarización Dual.
Fuente: [32]

Las ecuaciones que describen el comportamiento eléctrico del modelo de doble polarización son:

$$U'_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa} * C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \quad (4.11)$$

$$U'_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc}C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \quad (4.12)$$

$$U_L = U_{OC} - U_{pa} - U_{pc} - I_L * R_o \quad (4.13)$$

Donde U_{pa} es el voltaje en la red RC que describe la polarización de activación, U_{pc} es el voltaje en la red RC que describe la polarización de concentración.

En [32] se lleva a cabo el modelado de un módulo con el modelo de Polarización Dual, en donde la relación entre la tensión de circuito abierto (U_{OC}) y el (SoC) se obtienen de ensayos experimentales, los cuales implican pulsos de descarga cuando el acumulador se encuentra completamente cargado, con estos pulsos de corriente se extrae el 10% de la capacidad nominal del acumulador, después de cada pulso los autores dejan reposar el acumulador durante un tiempo lo suficiente como para que se estabilice la tensión y de esa forma obtener una relación entre la tensión de circuito abierto ante variaciones conocida del SoC . El proceso inverso se realiza con pulsos de carga que implican el 10% de la capacidad nominal, de tal manera que se completa un ciclo en el acumulador. El comportamiento que describe este proceso experimental se muestra en la Figura 4.8.

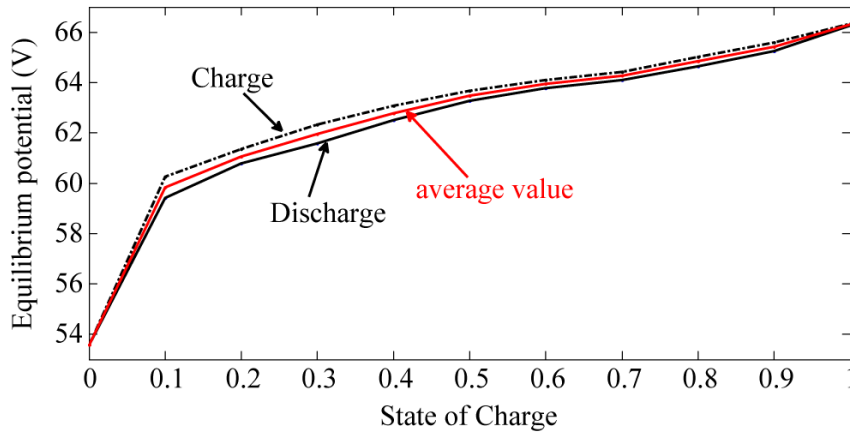


Figura 4.8: Relación entre el U_{OC} y el SoC .
Fuente: [32]

Nota: Equilibrium Potential (V), Potencial de Equilibrio (V); State of Charge, Estado de Carga; Charge, Carga; Discharge, Descarga; Average Value, Valor Promedio

Los valores de los parámetros se calculan en la curva de respuesta del acumulador en el ciclo de descarga entre el rango del 90% al 10% del SoC , con el perfil de corriente aplicado, el valor de la R_o se obtiene de la variación instantánea del voltaje dividida para la corriente de prueba aplicada (Figura 4.9), los elementos restantes que conforman las redes RC del modelo se obtienen al hacer uso de un filtro de Kalman Adaptativo el cual

permite calcular de forma más precisa los parámetros de un sistema no lineal pero requiere un alto nivel de programación según los autores.

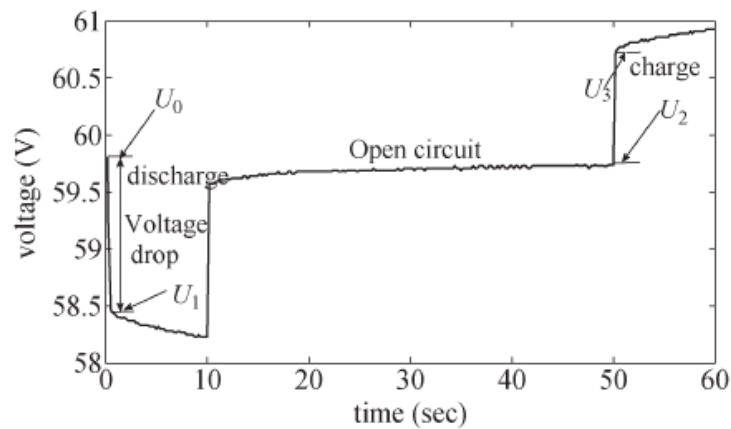


Figura 4.9: Perfil del voltaje del módulo acumulador.

Fuente: [32]

Nota: Voltage (V), Voltaje (V); Voltage drop, Caída de Voltaje; Open Circuit, Circuito Abierto; Charge, Carga.

En la Figura 4.10, se presenta la validación del modelo, en donde según los autores se obtiene una tasa de error máxima de 4,15%, lo que verifica que el algoritmo de identificación de parámetros y el modelo mejorado de Thévenin son precisos y razonables [32].

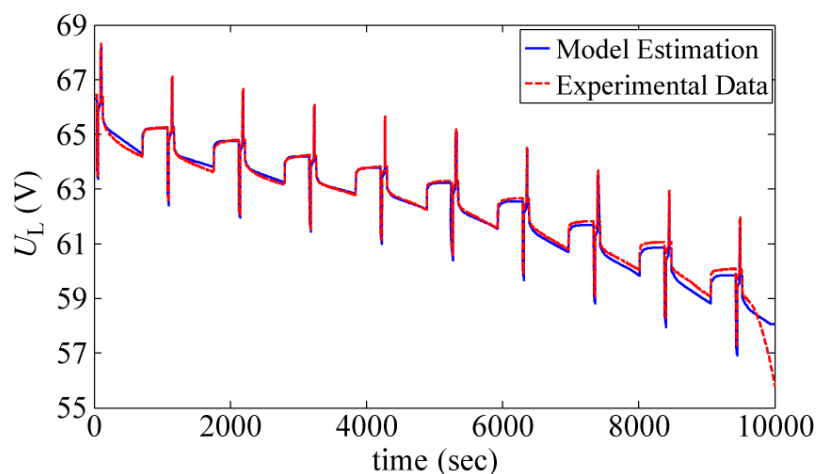


Figura 4.10: Respuesta de la tensión terminal experimental vs modelado.

Fuente: [32]

Nota: Model Estimation, Estimación del Modelo; Experimental Data, Datos Experimentales. Time (sec), Tiempo (segundos).

4.5 Modelo de Circuito Equivalente propuesto por Chen 2006

Este es un modelo con mayor grado de dificultad que los presentados en los apartados anteriores, una de las características más importantes de este, es que sus elementos son componentes no lineales los cuales varían en función del SoC del acumulador, según el autor con este modelo quiere predecir el comportamiento no lineal o tiempo de ejecución, el SoC y la respuesta transitoria del acumulador.

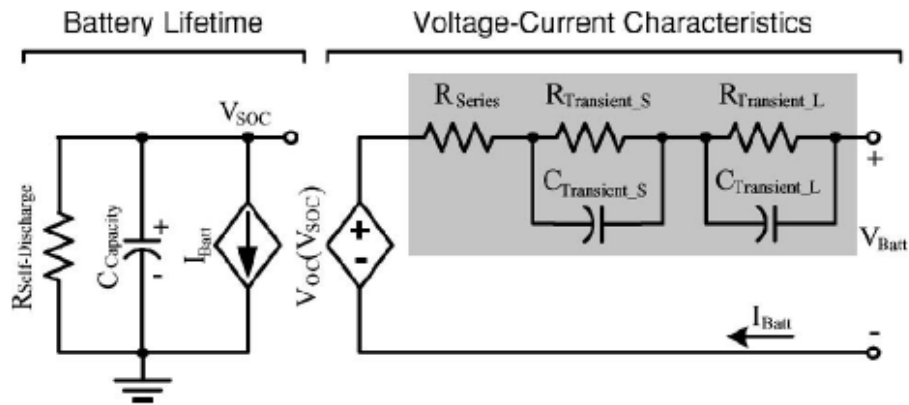


Figura 4.11: Modelo propuesto por Chen 2006.
Fuente: [28]

Nota: Battery Lifetime, Duración de la Batería, Voltage-Current Characteristics, Características Corriente-Voltaje; Series, Serie, Transient, Transitorio.

El circuito equivalente propuesto en [28] (Figura 4.11), es un modelo robusto y según el autor preciso, está conformado por dos circuitos que a su vez constan de elementos que reproducen diferentes efectos en un acumulador. El modelo propuesto captura las características eléctricas dinámicas del acumulador, siendo estas el SoC , el voltaje de circuito abierto y la respuesta transitoria.

El autor propone el modelado con la capacidad utilizable, la cual es la energía que se obtiene del acumulador una vez que esté se descarga desde un estado completamente cargado hasta su tensión de corte. La capacidad utilizable se simula en el modelo con un condensador de plena carga $C_{capacidad}$ (siendo esta la carga total almacenada) y una resistencia de autodescarga.

En el modelo propuesto en [28] el SoC en coulomb será dependiente de la capacidad utilizables la cual se define como se muestra en la ecuación 4.14, en donde $f1$ y $f2$ son factores correctores del número de ciclos y de la temperatura del acumulador respectivamente, los cuales son simplificados al valor de uno ya que la celda que se analiza en [28] es nueva y se hace uso de un ventilador para mantener la temperatura del acumulador constante, Cn es la capacidad nominal dada por el fabricante.

$$C_{Capacidad} = 3600 * C_n * f_1 (Ciclos) * f_2 (Temp) \quad (4.14)$$

La relación no lineal que hay entre el *SoC* y la tensión de circuito abierto como se muestra en la Figura 4.12, se representa con una fuente de tensión controlada $VOC(V_{SoC})$, siendo V_{SoC} un valor que varía de 1 a 0 correspondiendo en forma cuantitativa al 100% y 0% respectivamente, del *SoC* del acumulador.

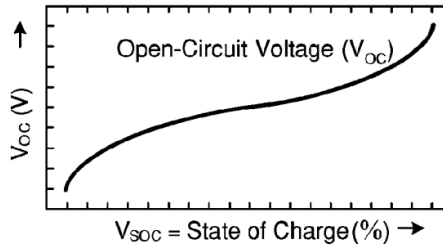


Figura 4.12: VOC vs *SoC*.

Fuente: [28]

Nota: State of Charge (%), Estado de Carga (%); Open-Circuit Voltage (V_{oc} (V)), Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc} (V)).

La respuesta transitoria del acumulador de energía, hace referencia a la forma de cómo responde el acumulador ante un escalón de corriente ya sea de carga o descarga. La curva de respuesta del acumulador se presenta en la Figura 4.13, el efecto transitorio se reproduce con la parte sobrada del modelo propuesto en [28] (Figura 4.11), esta parte de la red eléctrica que se encarga de reproducir la respuesta transitoria, como se ve, consta de una resistencia en serie R_{serie} que simula la caída de tensión instantánea, las redes $RC_{T\ Corto}$ y $RC_{T\ Largo}$ se encargan de la reproducción de las constantes de tiempo corto y largo al escalón respectivamente. Según el autor, el propósito de hacer uso de dos redes RC en lugar de uno, tres o más, se debe a que el equilibrio entre la precisión y la complejidad es moderado, ya que con dos redes RC mantienen errores de $1mV$ para los ajustes de las curvas [28].

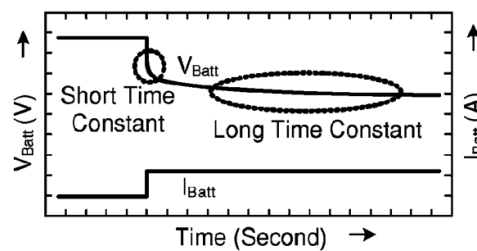


Figura 4.13: Respuesta transitoria de salto de corriente.

Fuente: [28]

Nota: Short Time Constant, Contante de Tiempo Corto; Long Time Constant, Constante de Tiempo Largo, Time (Second), Tiempo (Segundos).

Los otros elementos tales como la resistencia $R_{Self-Discharge}$ que representa la pérdida de energía del acumulador cuando este se almacena durante mucho tiempo, según el autor se puede simplificar como una resistencia muy grande o incluso ignorarse, esto es debido a que la capacidad del acumulador disminuye lentamente con el tiempo cuando no se conecta ninguna carga al acumulador, esto se puede ver en la Figura 4.14.

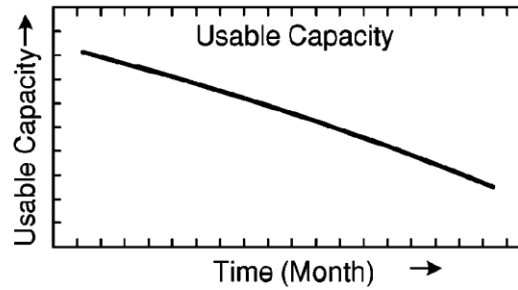


Figura 4.14: Capacidad utilizable vs tiempo de almacenamiento.
Fuente: [28]

Nota: Usable Capacity, Capacidad Utilizable; Time (Month), Tiempo (Meses).

El capacitor denominado $C_{Capacidad}$ y la fuente de corriente controlada, simulan como la capacidad del elemento depende de la corriente aplicada y del tiempo (battery runtime).

Las ecuaciones que expresan el comportamiento eléctrico de este modelo son:

$$U'_{TS} = -\frac{U_{TS}}{R_{TS} \cdot C_{TS}} + \frac{I_{Bat}}{C_{TS}} \quad (4.15)$$

$$U'_{TL} = -\frac{U_{TL}}{R_{TL} \cdot C_{TL}} + \frac{I_{Bat}}{C_{TL}} \quad (4.16)$$

$$U_{Bat} = U_{OC}(V_{SOC}) - U_{TS} - U_{TL} - I_{Bat} \cdot R_o \quad (4.17)$$

La manera en la que se obtienen los parámetros que conforman el circuito equivalente que se propone y se modela en [28] se presenta a continuación.

Para el modelado que se realiza en el estudio de [28], el autor hace uso de una celda de Polímero de Ion Litio del TCL PL-383562, los datos de esta celda se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Datos técnicos de la batería probada en [28].
Fuente: [34]

Parámetro	Valor
Capacidad Nominal	880mAH
Capacidad Mínima	850mAH
Voltaje límite de carga	4,2 V
Voltaje Nominal	3,7V
Voltaje límite de descarga	3V
Corriente de carga máxima	1275mA
Corriente de descarga máxima	1700mA

El proceso que llevo a cabo el autor en diez celdas del mismo tipo, fue cargarlas a corrientes constantes inferiores a los 800mA hasta llegar a corrientes de fin de carga de 10mA, luego fueron descargadas hasta alcanzar la tensión de corte con pulsos de corrientes de 80, 160, 320 y 640mA adecuadamente espaciadas. En la Figura 4.15, se muestra en comportamiento de las celdas cuando se aplica la corrientes de pulsos de 320mA.

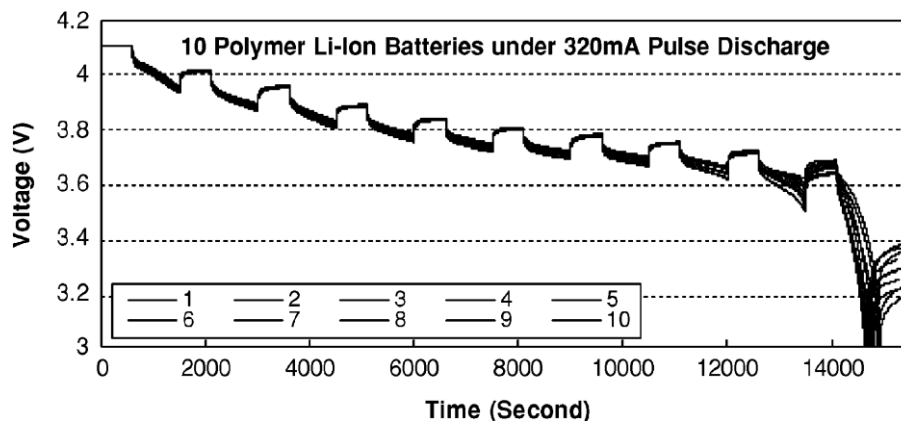


Figura 4.15: Curvas de descarga con pulsos de 320 mA en diez baterías de Li-ion de polímero.
Fuente: [28]

Nota: Voltaje (V), Voltaje (V); Time (Second), Timpo (Segundos); 10 Polymer Li-Ion Batteries under 320mA Pulse Discharge, 10 Baterías de Polímero de Iones de Litio bajo Pulsos de Descarga de 320mA.

Según el autor estas celdas presentan una variación en el tiempo de ejecución del 2% y un error inferior a los 30mV en el rango del 10% al 100% de SoC, mientras que en el rango del 0% al 10% del SoC presentan un error bastante notable en la variación del voltaje, esto se debe a la fuerte caída de tensión que presenta el acumulador en estos rangos.

Para la parametrización del modelo se elige la celda que presenta la curva en el centro de los nueve restantes, los elementos del modelo se van caracterizando en función del SoC que va presentado el acumulador en cada variación conocida del mismo, de tal

manera que las curvas que describen dicho proceso se presentan en la Figura 4.16, según el autor, se presentan pequeñas diferencias entre las curvas de los parámetros para diferentes corrientes de descargas, por lo que llega a la conclusión que los parámetros del modelo no varían en función de la corriente aplicada al acumulador.

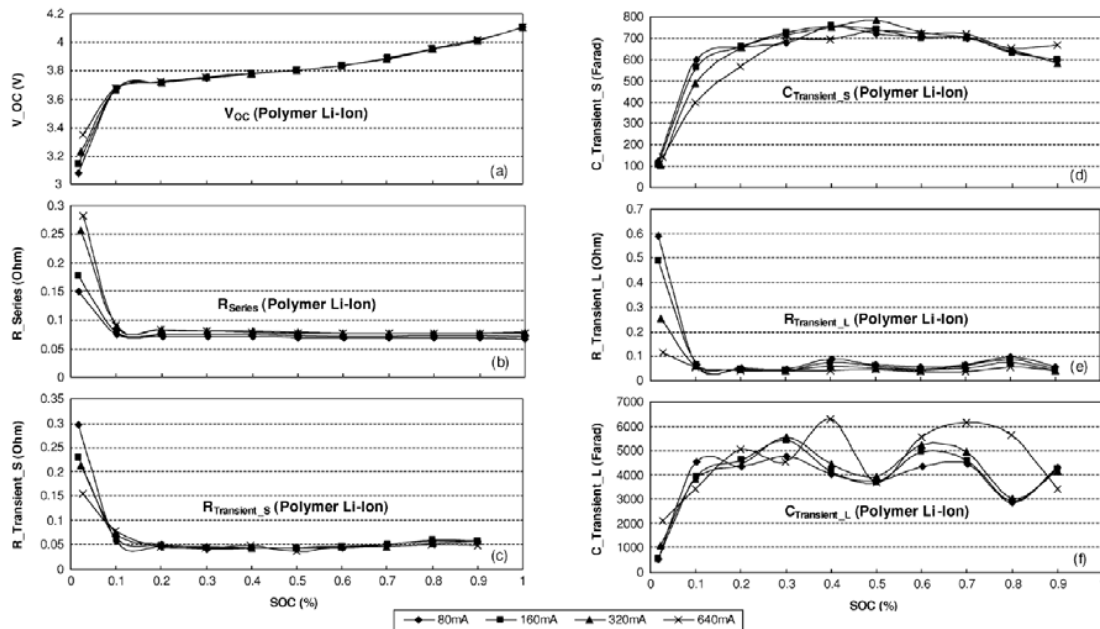


Figura 4.16: Parámetros extraídos de la batería de Li-ion de polímero a temperatura ambiente en el modelo Chen 2006.

Fuente: [28]

Nota: Polymer Li-Ion, Polímero de Li-Ion; Series, Serie; Transient, Transitorio.

Los parámetros del modelo se obtienen al realizar un ajuste exponencial a cada curva que representa cada parámetro del modelo.

Para la validación del modelo, el autor somete al acumulador a diferentes perfiles de corrientes de carga y descarga, la diferencia máxima entre los resultados presentados en la simulación del modelo y los resultados experimentales en el acumulador son del 20mV en el voltaje y 0,338% en el tiempo de ejecución.

4.6 Modelo de circuito equivalente propuesto por S.P Castaño Solís 2014

La necesidad de disponer de un modelo que reproduzca el comportamiento de un módulo ha llevado a que en la investigación desarrollada en [24], se desarrolle un modelo de un banco acumulador de la marca SAFT 7S8Pmp176065, este banco acumulador está compuesto por ocho juegos (siete celdas conectadas en serie) en

paralelo (56 celda en total), las características eléctricas de este banco acumulador se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Datos técnicos de la batería probada en [24].
Fuente: [24]

Parámetro	Valor
Tensión Nominal	25,9V
Tensión Máxima de Carga	29,4V
Tensión de Corte en Descarga	20,3V
Capacidad Nominal (Fabricante)	53Ah
Capacidad Asignada	50Ah
I máxima	50A continuos, 60A pulsos menores 1 seg.
Intervalos de temperatura en carga	-20°C;60°C
Intervalos de temperatura en descarga	-30°C;55°C

El modelo propuesto en [24] se presenta en la Figura 4.17, este modelo consta de una fuente de tensión ideal E_0 que según el autor representa el valor inicial de la tensión del módulo cuyo valor se mide al inicio de cada ciclo y se mantiene constante durante todo el tiempo de la simulación, un condensador ideal C que está en serie con la fuente ideal de tensión sirve para representar la dependencia de la capacidad del acumulador con respecto a la corriente y el tiempo, la resistencia R_0 corresponde a la resistencia de los electrodos, separador, electrolito y elementos de contacto, finalmente la red RC sirve para reproducir el proceso de difusión y de transferencia de carga.

Los parámetros de los elementos que conforman el circuito eléctrico equivalente a excepción de la resistencia óhmica y de la fuente ideal constante están en función del SoC del acumulador. El algoritmo para la estimación del SoC que se implementa en el modelado es la integración de *amperios · hora*.

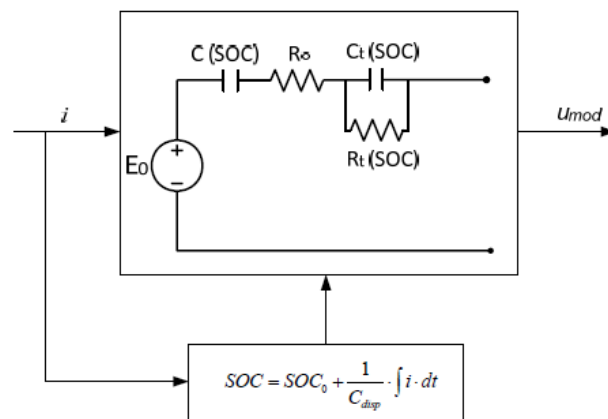


Figura 4.17: Esquema del modelo propuesto por S.P Castaño Solís 2014.
Fuente: [24]

La ecuación 4.18 caracteriza el comportamiento eléctrico del circuito equivalente del módulo en [24]:

$$U_{mod} = E_0 - U_c - U_{R_0} - U_{RC} \quad (4.18)$$

En [24] el autor realiza el cálculo de los parámetros del modelo por los métodos de interrupción de corriente y de espectroscopía de la impedancia, en el primer proceso que es el que se analiza en esta revisión bibliográfica, el acumulador se carga con una corriente inicial de 25A hasta que la tensión terminal llega a los 29,4V y la corriente de carga del acumulador disminuye a 50mA momento en el cual se considera que el acumulador ha llegado al 100% de su *SoC*, luego de un reposo de 90 minutos, se inicia la descarga del acumulador con una corriente de descarga de 10A durante 30 minutos con tiempo de relajación de 90 minutos, para el proceso de carga del acumulador se inyecta 10A durante 30 minutos y con tiempos de relajación de 90 minutos, en la Figura 4.18 se puede ver el comportamiento de la tensión en los terminales del acumulador en el proceso de descarga (Figura 4.18.a) y de carga (Figura 4.18.b).

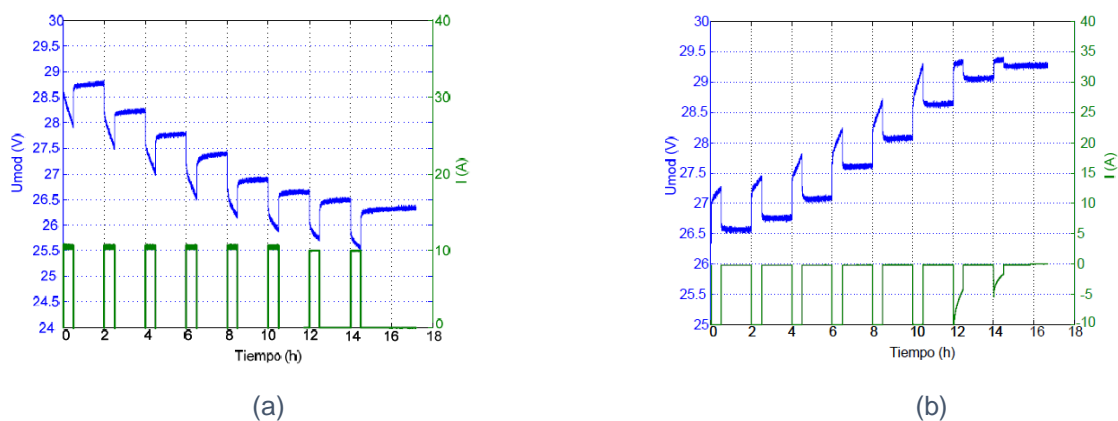


Figura 4.18: Voltaje del acumulador y perfil de corriente en S.P Castaño Solís 2014.
a) Descarga. b) Carga.

Fuente: [24]

Los elementos del modelo al estar en función del estado de carga (*SoC*) del acumulador (con el fin de determinar cómo este influye sobre los elementos) y debido a que los módulos acumuladores de energía son utilizados entre el 20% y 80% del *SoC* para garantizar un funcionamiento óptimo de los componentes del banco, en [24] los elementos del circuito equivalente del modelo se parametrizan en función del *SoC* dentro de este rango en cada punto de prueba en el que aplica el perfil de corriente.

En la Figura 4.19, se muestran los valores asociados a los cálculos de los parámetros del circuito equivalente del modelo propuesto en [24].

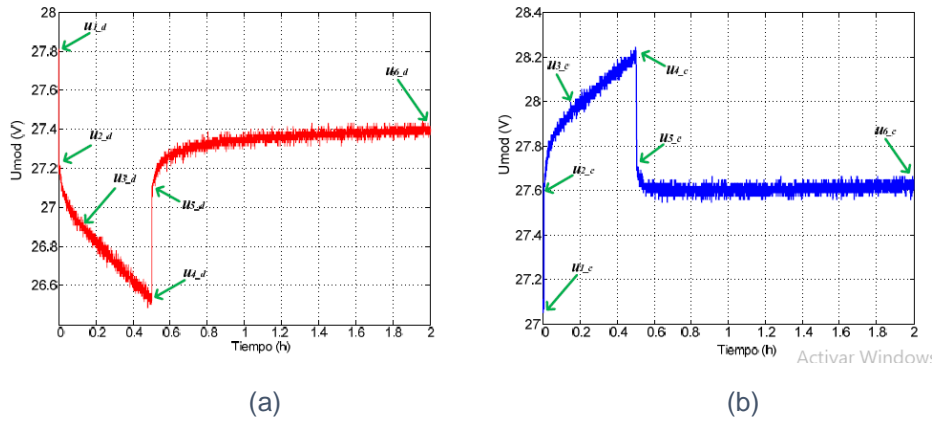


Figura 4.19: Valores involucrados en los cálculos de parámetros del circuito equivalente.

a) Descarga. b) Carga.

Fuente: [24]

El autor realiza el cálculo de los parámetros en un ciclo completo del acumulador, de tal manera que promedia los dos resultados de los parámetros obtenidos en el medio ciclo de descarga y de carga correspondientemente, los puntos de prueba corresponden a los siguientes estados de carga mostrados en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Puntos de prueba del SoC en [24].

Fuente: [24]

SoC (%) Descarga	74,8	64,7	54,6	44,6	34,5	24,4
SoC (%) Carga	24,4	34,5	44,6	54,6	64,7	74,8

La manera en la que se obtiene los parámetros del circuito equivalente se describe a continuación:

La resistencia óhmica se obtiene de los cambios instantáneos de la tensión al inicio y al final de cada escalón de corriente, el valor final de la resistencia óhmica en cada punto de prueba es el valor promedio de los dos valores involucrados, finalmente el valor de la resistencia óhmica del modelo es el valor promedio de los doce valores obtenidos en el ciclo completo, quedando así; $R_o = 0,046\Omega$.

$$R_{o_d1} = \frac{\Delta U_{R_{o_d1}}}{i} = \frac{U_{1,d} - U_{2,d}}{i} \quad (4.19)$$

$$R_{o_d2} = \frac{\Delta U_{R_o_d2}}{i} = \frac{U_{5_d} - U_{4_d}}{i} \quad (4.20)$$

$$R_{o_c1} = \frac{\Delta U_{R_o_c1}}{i} = \frac{U_{2_c} - U_{1_c}}{i} \quad (4.21)$$

$$R_{o_c2} = \frac{\Delta U_{R_o_c2}}{i} = \frac{U_{4_c} - U_{5_c}}{i} \quad (4.22)$$

El proceso que se lleva a cabo para obtener los parámetros de la red RC, es el que se realiza la mayoría de los modelados, haciendo uso del efecto de polarización dado en la curva de respuesta del voltaje del acumulador en el transitorio corto y con las ecuaciones 4.23 a 4.27 se obtiene los parámetros en cada punto de prueba:

$$U_{RC} = \int \frac{1}{C_t} \left(i - \frac{u_{Ct}}{R_t} \right) \quad (4.23)$$

$$R_{t_d} = \frac{U_{2_d} - U_{3_d}}{i} \quad (4.24)$$

$$C_{t_d} = \frac{\tau_d}{R_{t_d}} \quad (4.25)$$

$$R_{t_c} = \frac{U_{2_c} - U_{3_c}}{i} \quad (4.26)$$

$$C_{t_c} = \frac{\tau_c}{R_{t_c}} \quad (4.27)$$

Al tener dos valores de cada parámetro en cada punto de prueba, estos son promediados para simplificar la dependencia R_t y C_t con respecto al SoC .

En el cálculo del condensador que representa la dependencia de la capacidad del módulo con respecto a la corriente y el tiempo, el autor propone el uso de un parámetro denominado α , donde este es el valor correspondiente a la variación de la tensión con respecto al tiempo y a la corriente de prueba (pendiente de la sección de transitorio largo), de igual forma se tiene dos valores para cada punto de prueba (SoC) los cuales son promediados.

$$\alpha_d = \frac{U_{1_d} - U_{6_d}}{\Delta t_d * i_d} \quad (4.28)$$

$$\alpha_c = \frac{U_{6,c} - U_{1,c}}{\Delta t_c * i_c} \quad (4.29)$$

Para el cálculo del SoC actual del acumulador, y con el fin de evitar errores en la estimación del SoC_0 se introduce la relación que existe entre la tensión de circuito abierto (VOC) y el SoC del banco, así también en lugar de hacer uso de la capacidad nominal del banco que es dada por el fabricante (obtenida bajo condiciones específicas de funcionamiento), en [24] se determina la relación entre la capacidad disponible y la corriente suministrada (esto con el fin de tener en cuenta la capacidad real del módulo durante las simulaciones). Los resultados que se consiguen al someter al banco a diferentes perfiles de corriente es que la capacidad del módulo varía entre 49,692Ah y 49,166Ah, aunque la diferencia corresponde solo al 1% del valor de la capacidad del módulo, el autor recomienda hacer uso de la capacidad disponible de acuerdo a la aplicación que se le vaya a dar al módulo.

La validación de este modelo en [24] se realiza con un ciclo de conducción NEDC (New European Driving Cycle) Figura 4.20, para generar esta señal experimental el autor reproduce por medio del sistema dSPACE Real-time OS en tiempo real la potencia demandada por el vehículo y además controla la potencia del conjunto (módulo, carga electrónica, fuente c.c.) al realizar este ciclo de conducción.

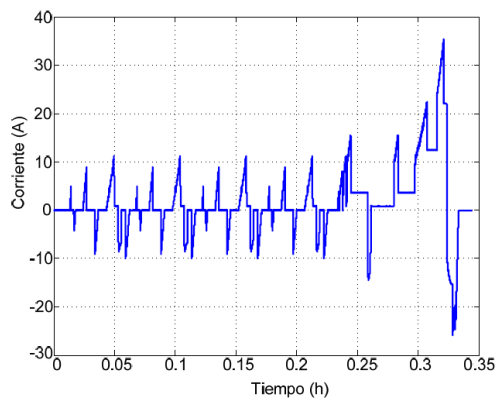


Figura 4.20: Perfil de corriente en un ciclo de conducción NEDC.

Fuente: [24]

Según (24) no se presenta una desviación elevada al comparar los resultados experimentales con los del modelado como se puede ver en la Figura 4.21, a decir del autor, la desviación máxima que se obtiene es de 0,24 V, pero en las zonas ampliadas se puede ver (Figura 4.22) que el modelo no es capaz de reproducir completamente el comportamiento dinámico del módulo.

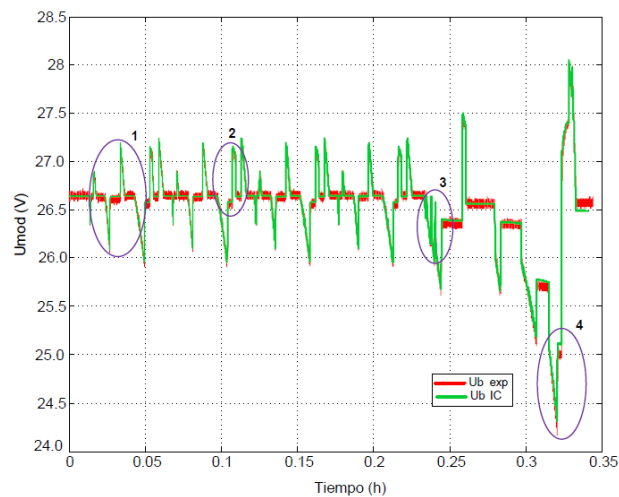
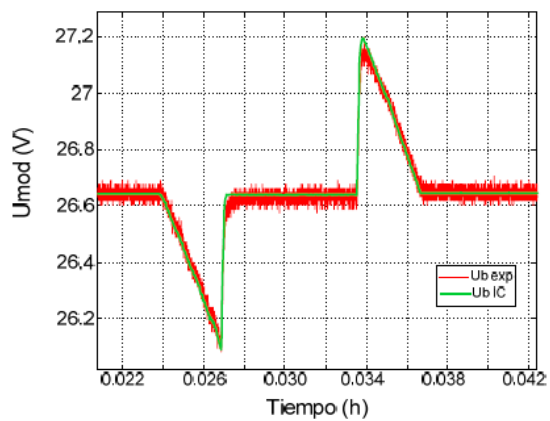
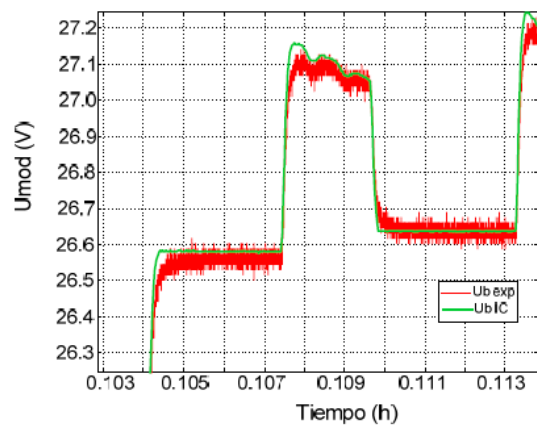


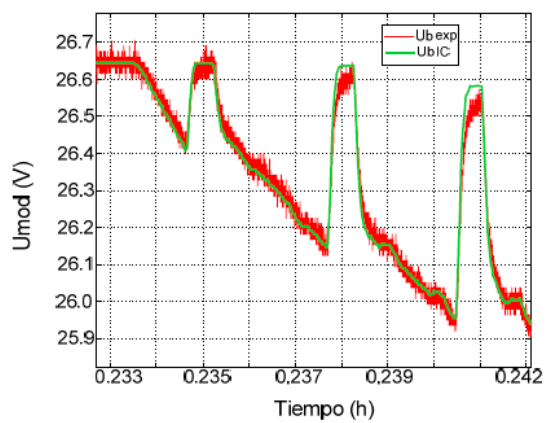
Figura 4.21: Resultado experimental vs resultado modelo S.P Castaño Solís 2014.
Fuente: [24]



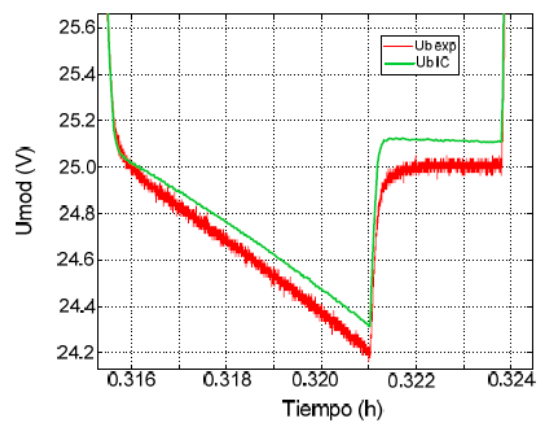
(1)



(2)



(3)



(4)

Figura 4.22: Zonas de la figura 4.21 aplicadas.
Fuente: [24]

4.7 Modelado de Baterías a partir de Celdas Propuesto por Kim 2013

En el trabajo desarrollado en [35] se propone el modelado de un módulo acumulador, con el objetivo principal de conseguir un mejor equilibrio *Voltaje – SoC* de un paquete de celdas de Ion Litio conectadas en serie, para ello el autor somete a dieciocho celdas nuevas de Ion Litio con capacidad de 1,3Ah a dos procesos de selección. El primero de ellos consiste en seleccionar a las celdas con capacidades parecidas. El segundo proceso es determinar la resistencia de las celdas, de tal manera que las celdas con capacidades y resistencias similares son las empleadas para conformar el módulo.

El circuito equivalente que los autores utilizan es el presentado en la Figura 4.23. Con el fin de determinar la validez del proceso de preselección de las celdas, las simulaciones se comparan con los resultados experimentales obtenidos en bancos conformados de dos y tres celdas en serie, con y sin similares características.

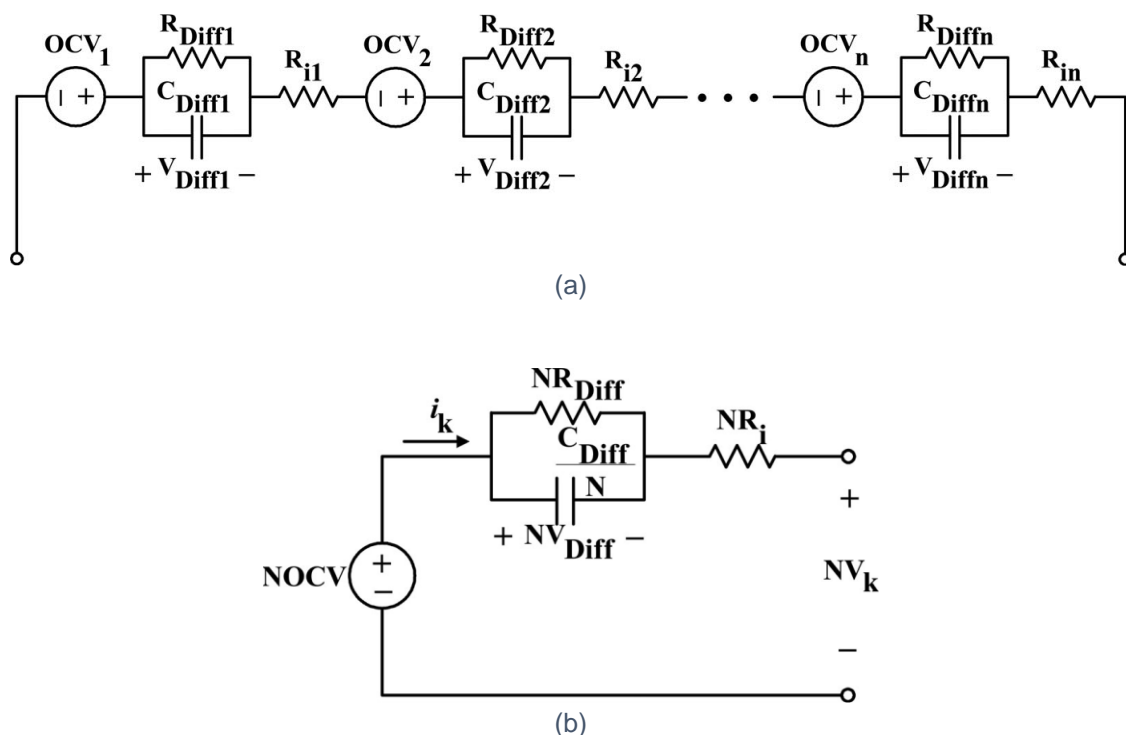


Figura 4.23: a) Configuración de celdas en serie. b) Circuito equivalente propuesto en [35].
Fuente: [35]

Al comparar los resultados experimentales con los obtenidos en las simulaciones (Figura 5.24), se puede evidenciar que los obtenidos por las celdas preseleccionadas muestran mejor estabilidad que los que arrojan las celdas con capacidades y resistencias diferentes.

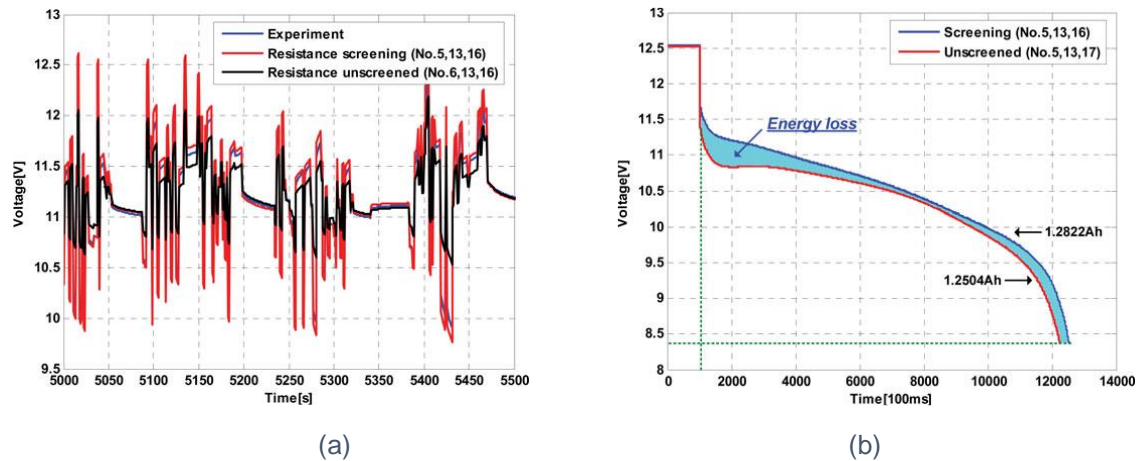


Figura 4.24: Validación del modelo en Kim 2013.

- Errores de voltaje entre voltaje experimental y voltajes de salida del modelo (3S1P) con y sin la detección de resistencia en el proceso de preselección.
- Curvas de descarga para verificar la pérdida de energía de dos paquetes de baterías en serie (3S1P) con y sin el proceso de selección propuesto.

Fuente: [35]

Nota: Voltage (V), Voltaje (V); Experiment, Experimento; Resistance Screening, Resistencia Seleccionadas; Resistance Unscreened, Resistencia no Seleccionadas; Time, Tiempo; Energy Loss, Pérdida de Energía.

Dado a que el resultado del modelo propuesto es válido solo para módulos compuestos por celdas que han sido preseleccionadas, este proceso no es aplicable para el caso de módulos comerciales en los cuales no hay posibilidad de que el usuario final pueda aplicar los dos procesos de preselección propuestos por los autores [24].

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS, MODELADO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL CON LOS MODELOS DE CIRCUITOS EQUIVALENTES

En esta investigación, se propone desde un inicio el modelado y parametrización eléctrica de baterías de Ion Litio para vehículos eléctricos. En el capítulo 4 se realizó una revisión bibliográfica de los modelos propuestos en los diferentes artículos científicos, de los cuales se usarán aquellos que hacen que su parametrización sea posible de acuerdo a las condiciones de trabajo disponibles (Capacidades actuales de los laboratorios disponibles). Los elementos acumuladores a modelar son: banco acumulador de la marca SK Inovation, el cual esta ensamblado en el vehículo Kia Soul 2015, que está disponible en el Laboratorio de Micro redes de la Universidad de Cuenca. Además, se realiza el modelado de dos tipos de celdas acumuladoras de las marcas Samsung SDI y A123 Systems, con el fin de caracterizar el comportamiento de estas celdas para las condiciones requeridas por el vehículo seleccionado.

5.1 Consideraciones del modelo a seleccionar

Para llevar a cabo el modelado de un elemento acumulador de energía eléctrica, es necesario que el modelo sea capaz de reproducir el funcionamiento del elemento, de tal manera que se requiere de un circuito eléctrico que simule la respuesta del voltaje en los bornes del acumulador y de un algoritmo que permita estimar el estado de carga (*SoC*) del mismo. En la Figura 5.1 se presenta el esquema para el modelado de un acumulador electroquímico.

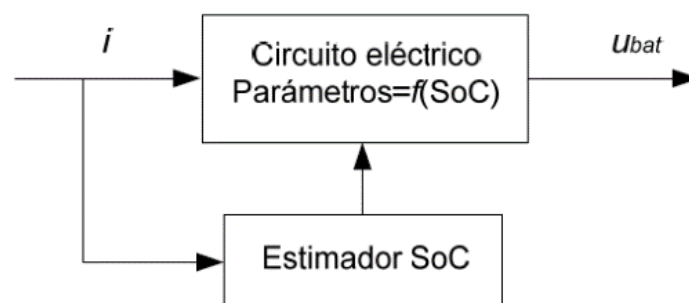


Figura 5.1: Esquema del modelo de un acumulador.
Fuente: [24]

5.2 Cálculo del Estado de Carga (SoC)

El algoritmo que se utiliza para la estimación del estado de carga SoC , tanto en el modelado del banco acumulador así como en el modelado de las celdas, es el algoritmo basado en la integración de *amperios · hora*. Esta técnica al ser de fácil programación en su algoritmo de cálculo, ha hecho que sea ampliamente aceptada en la estimación del SoC de acumuladores de energía, entre ellos la tecnología de Ion Litio. La ecuación 5.1 corresponde al cálculo del SoC , donde SoC_0 es el valor inicial del estado de carga del elemento analizado, C_n es la capacidad nominal del elemento el cual por lo general viene dado por el fabricante y finalmente I que corresponde a la corriente (sea de carga o descarga) que se aplica al acumulador.

$$SoC = SoC_0 - \frac{1}{C_n} \int I \cdot dt \quad (5.1)$$

El signo de I corresponde al sentido de la corriente a la cual es sometido el elemento (positiva para descarga y negativa para la carga).

5.3 Modelado del Pack Acumulador del VE Kia Soul

El Kia Soul es un vehículo eléctrico tipo VEB. El pack acumulador del vehículo Kia Soul corresponde al tipo “Polímero de Ion Litio” y presenta las características mostradas en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Datos técnicos del pack acumulador del VE Kia Soul.
Fuente: [21] [36] [37]

Fabricante	SK Innovation
Tipo	Polímero de Ion Litio
Número de celdas	192 celdas
Configuración del pack	96S2P
Voltaje nominal en celda/pack	3,7/355,2V
SoC	5%/95%
Voltaje máximo/Voltaje mínimo en el pack	240V/413V
Voltaje máximo/Voltaje mínimo por celda	2,50V/4,30 V
Energía utilizable del pack	27 kWh
Capacidad nominal	75 Ah
Masa del pack	202,8 kg
Volumen del pack	216,5 L
Energía específica del pack	160 Wh/kg
Densidad de Energía del pack	150 Wh/L

El banco acumulador del vehículo está compuesto por ocho módulos de celdas de la marca SK Innovation (Figura 5.2.a). En la Figura 5.2.b se presenta el pack acumulador (con la distribución de los módulos), mientras que en la Figura 5.2.c se muestra como este está acoplado al VE.

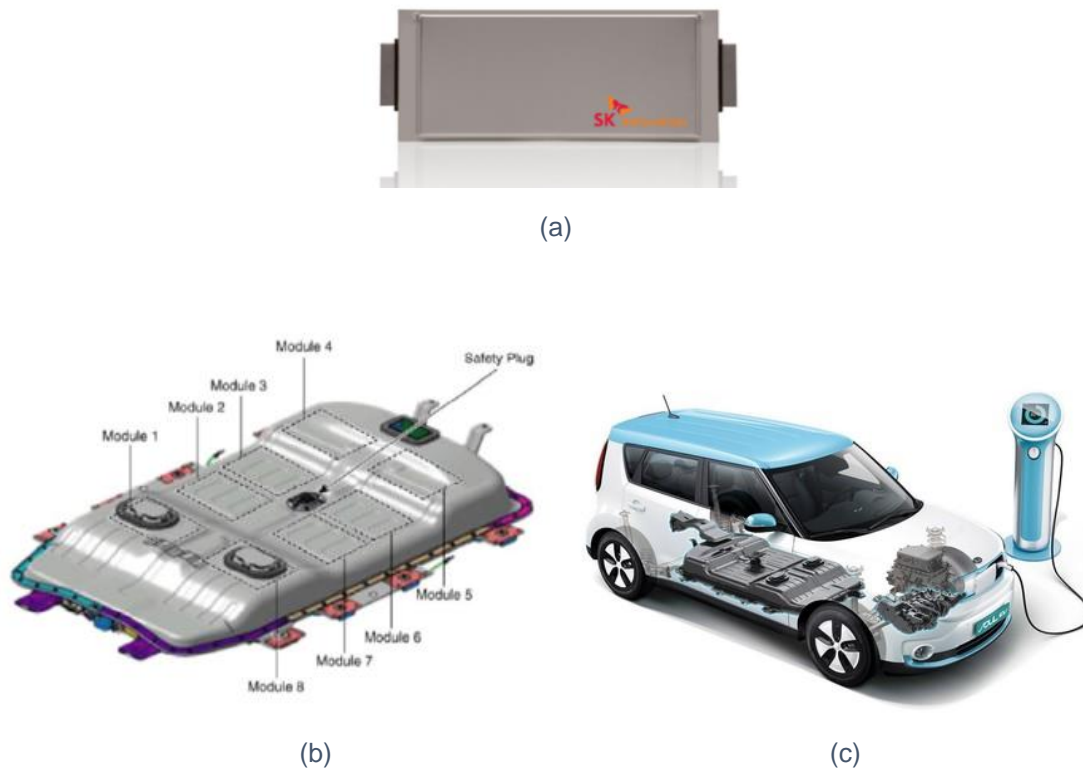


Figura 5.2: Estructura del acumulador del VE Kia Soul.
a) Celda SK Innovation. b) Banco de módulos. c) VE Kia Soul.
Fuente: [38] [39]

5.3.1 Proceso Experimental

En el estudio desarrollado en [40], se lleva a cabo distintos recorridos del vehículo con el fin de determinar el rendimiento energético del mismo. Para el modelado del banco acumulador del VE Kia Soul en este estudio, se toman los datos recolectados (voltaje, corriente, *SoC*, tiempo) cuando el vehículo se somete a un recorrido de alta velocidad en donde su estado de carga (*SoC*) varía del 95% al 15% (*SoC* real).

Las características del trayecto recorrido consisten en vías de una velocidad promedio de 50km/h, curvas pronunciadas, una elevación entre (2571msnm-4163msnm), temperatura promedio de 4°C a 13°C y con la presencia de niebla. Este ambiente corresponde a la vía Cuenca-Molleturo, pasando por el Parque Nacional el Cajas. El recorrido se puede visualizar en la Figura 5.3.

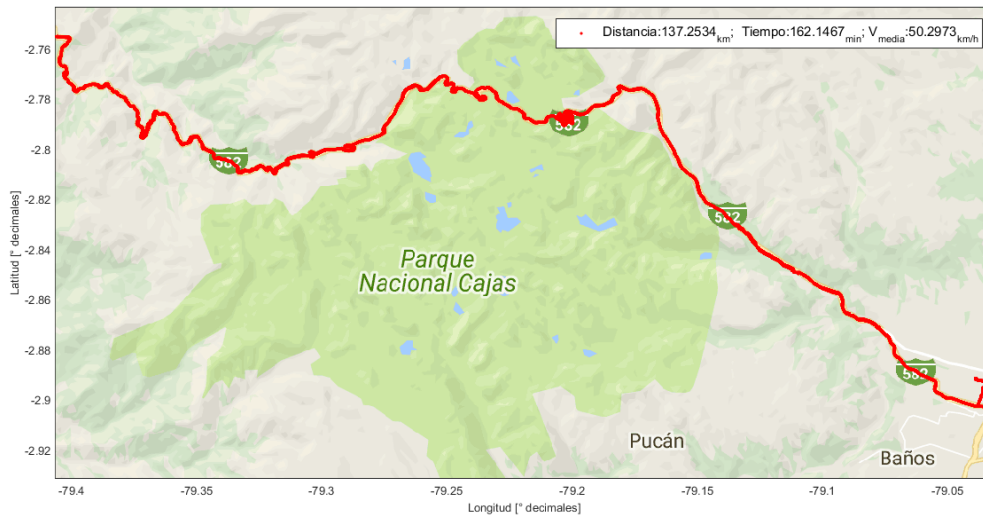


Figura 5.3: Trayecto del recorrido del VE Kia Soul.
Fuente: [40]

La adquisición de datos del vehículo en el proceso experimental de [40], se lo hace por medio del sistema OBD2 (On Board Diagnostics; Dispuesto en el vehículo), en el cual se conecta el escáner ELM327 que tiene como función adquirir datos de los sensores del vehículo. El escáner posee comunicación bluetooth que sirve como medio para la transferencia de archivos hacia un Smartphone con el software Torque Pro, el cual solicita y almacena información de los sensores. La adquisición de datos se la realiza cada décima de segundo, de tal manera que la lectura de datos es precisa. En la Figura 5.4 se presenta el esquema del sistema utilizado para el proceso experimental en [40].

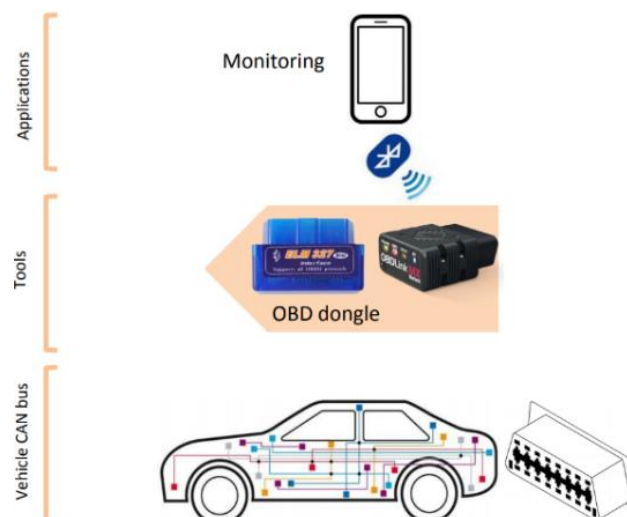


Figura 5.4: Diagrama del sistema de adquisición de datos.
Fuente: [40]

Nota: Vehicle CAN Bus, Vehículo con Protocolo CAN de Diagnóstico; Tools, Herramientas; Applications, Aplicaciones; OBD Dongle, Escaner OBD; Monitoring, Monitoreo.

El software muestra los datos del *SoC* que presentan los sensores directamente del banco acumulador (BMS) y los presentados en el display del tablero del vehículo que se muestra al usuario. Estos datos difieren entre sí debido a que el fabricante emplea un rango de seguridad para evitar que el acumulador funcione cerca de los límites. En este estudio se desarrolla el modelado del banco con los datos reales del *SoC*, es decir los presentados en los sensores que son dispuesto en el banco acumulador (BMS).

La respuesta del voltaje (durante el recorrido) que se presenta en el terminal del acumulador se muestra en la Figura 5.5.a. Como se puede ver, el estado de carga del acumulador varía del 95% al 15%. Debido al sistema de frenado regenerativo que posee el vehículo, la variación del voltaje terminal del acumulador es muy dinámico. En la Figura 5.5.b se presenta la corriente a la que se somete el banco acumulador en el recorrido.

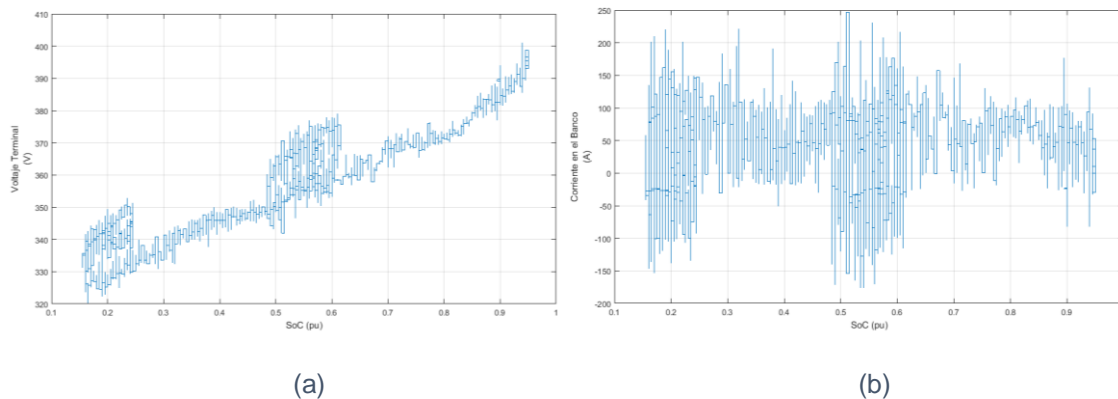


Figura 5.5: Respuesta del VE Kia Soul al recorrido.
a) Voltaje Terminal. b) Corriente Soportada por el Acumulador.

En la tabla 5.1, el estado de carga del banco acumulador varía del 5% al 95%, de tal manera que los valores correspondientes de los voltajes en el terminal del banco son 240V / 413V respectivamente. Con el fin de tener una visualización clara de la variación del voltaje terminal del banco, se agregan estos valores límite de voltaje asumiendo que son voltajes terminales y no *VOC*. Para una mejor perspectiva del comportamiento del voltaje terminal del acumulador se realiza el ajuste de esta curva con una ecuación de sexto orden (Figura 5.6).

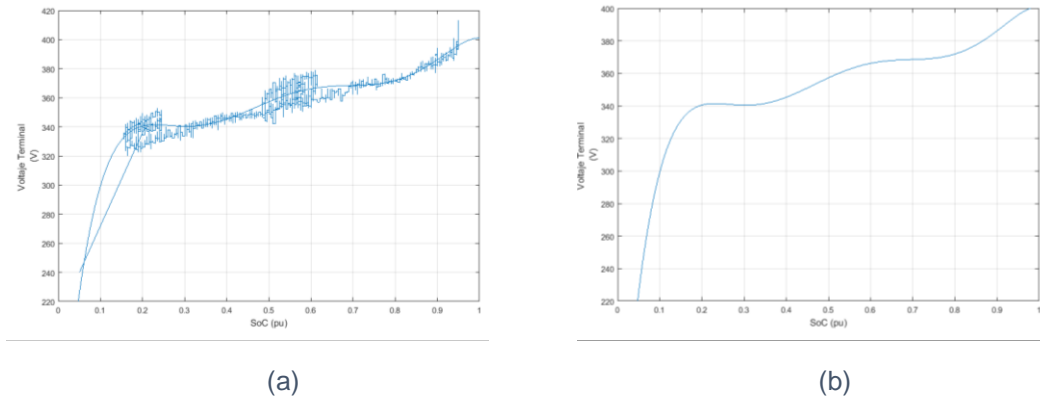


Figura 5.6: Voltaje Terminal del acumulador del VE Kia Soul.
a) Voltaje Terminal del Acumulador vs SoC (5% al 95%). b) Curva Ajustada.

5.3.2 Selección del Modelo de Circuito Equivalente

En el modelado del banco acumulador, se opta por hacer uso del modelo más básico que reproduce el comportamiento del acumulador, este modelo de circuito equivalente corresponde al “Modelo Equivalente de Resistencia Interna”. Se hace uso de este modelo más básico que se encuentra en la literatura científica debido a que este se ajusta a las condiciones de trabajo disponibles en el proceso experimental para la obtención de los parámetros.

De acuerdo al modelo seleccionado, los parámetros que conforman este circuito equivalente son: una resistencia en serie que representa la resistencia interna del banco y una fuente ideal de tensión que representa el voltaje de circuito abierto del acumulador. En este estudio, los valores de los elementos del circuito equivalente se calculan mediante una función matemática durante el tiempo de ejecución. Este modelo que se propone para el banco acumulador, combina la representación del circuito equivalente eléctrico con componentes matemáticos que dependen del estado de carga (*SoC*) del acumulador.

Luego de la selección del modelo se procede a obtener los parámetros de los elementos que conforman el circuito equivalente.

5.3.3 Obtención de los Parámetros del Modelo

Los parámetros del modelo se obtienen de los datos recolectados en el proceso experimental (recorrido del vehículo), en el que se ha logrado una variación del *SoC* del elemento acumulador del 95% al 15%; de tal manera que la parametrización de los elementos que conforman el circuito equivalente se realiza para este rango del *SoC*. Gracias al método aplicado para la obtención de la información del vehículo, es posible identificar cuando la corriente entra o sale del acumulador, es decir se identifica cuando

el banco está entregando energía a la carga o cuando está siendo abastecido por el sistema de frenado regenerativo. De igual forma es posible identificar las variaciones en el voltaje terminal del acumulador como se puede ver en la Figura 5.7.

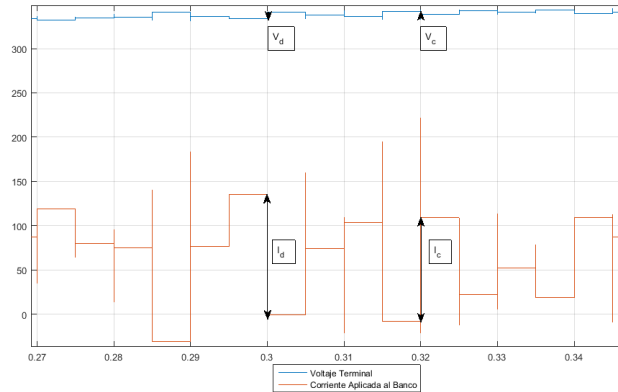


Figura 5.7: Voltaje Terminal (V) vs SoC (pu) y Corriente (A) vs SoC (pu) aplicados al banco.

La variación del voltaje en los terminales del acumulador es muy dinámica, esto es debido a que en el trayecto el vehículo se somete a diferentes condiciones geográficas, en las cuales la corriente (de carga o descarga) que se aplica al acumulador debe variar según las necesidades que requiere el vehículo cuando se expone al recorrido.

La variación de voltaje del sistema de acumulación se identifica cuando se está cargando o descargando según la dirección de la corriente (positivo en descarga y negativo en carga), por lo que la forma de obtener la resistencia interna del elemento, es aplicando la “Ley de Ohm” para cada delta de voltaje y corriente, en los diferentes estados de carga que va presentando el acumulador.

La resistencia interna del sistema acumulador según la ley de Ohm será entonces:

$$R_{int} = R_{serie} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_c}{I_c} = \frac{V_d}{I_d} \quad (5.2)$$

Realizado el proceso de cálculo de la resistencia interna para todas las variaciones de voltaje y corriente, se obtienen los valores de resistencia interna para los diferentes SoC que va presentando el banco. Al hacer un ajuste de primer orden en la curva de la resistencia interna (que está en función del SoC que presentó el acumulador) calculada, se visualiza como la resistencia interna del acumulador depende del SoC del mismo (Figura 5.8).

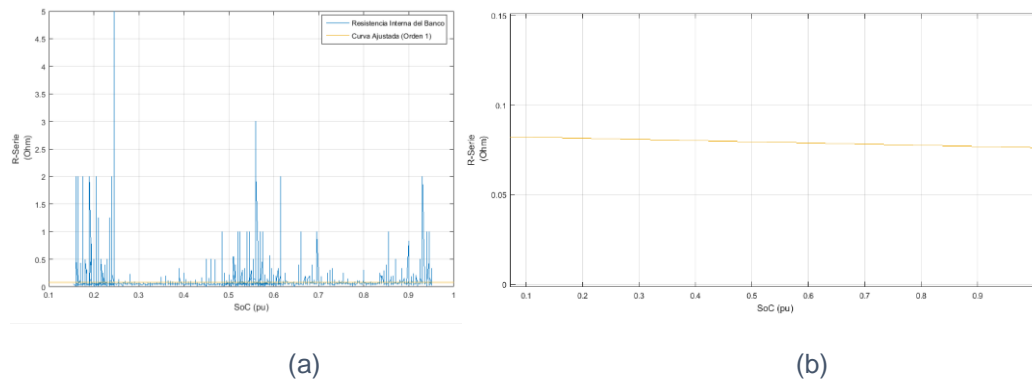


Figura 5.8: Resistencia interna del banco del VE Kia Soul en función del SoC .
a) Resistencia Interna del Banco. b) Ajuste de Primer Orden.

La ecuación 5.3 describe el comportamiento de la resistencia interna del elemento:

$$R_s = 0,082659 - 0,0065344 * SoC \quad (5.3)$$

Realizando una comparación con los valores obtenidos de la resistencia interna en este estudio (Figura 5.9.a), con respecto a los resultados que arrojan las pruebas de resistencia realizado por INL (Idaho National Laboratory en el vehículo eléctrico Kia Soul 2015), que dan como resultado el gráfico mostrado en la Figura 5.9.b, donde se puede observar que el valor se mantiene en torno a $0,08\Omega$, mientras que el valor promedio de la resistencia interna que se obtiene en este estudio es de $0,07958\Omega$.

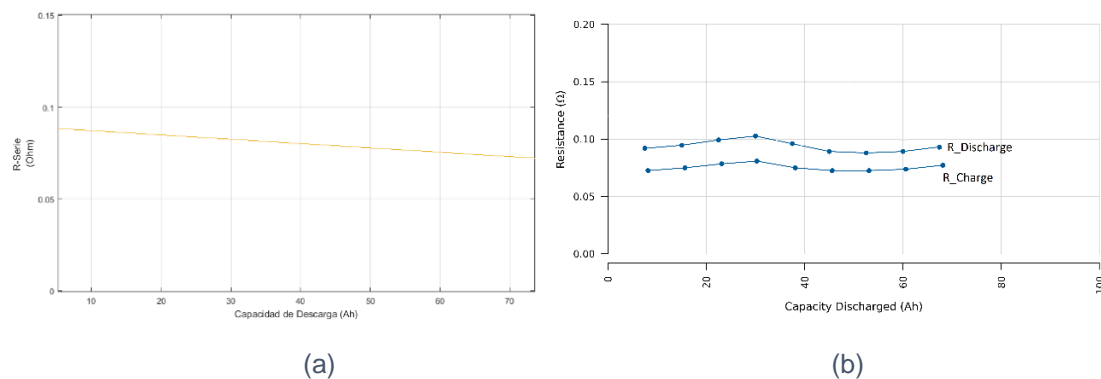


Figura 5.9: Resistencia interna del banco del VE Kia Soul en función de su capacidad de descarga.

a) Ajuste de Primer Orden de la Resistencia Interna del Banco.
b) Resistencia Interna proporcionada por INL.

Fuente: [21]

Nota: Resistance, Resistencia; Discharge, Descarga; Charge, Carga; Capacity Discharged (Ah), Capacidad de Descargada (Ah).

Al elegirse un modelo básico que reproduce el comportamiento de un acumulador de energía, se desprecia la respuesta transitoria que presenta el banco acumulador (V_{RC} en la Figura 5.10.a), de tal manera que el voltaje de circuito abierto del módulo se obtiene de la diferencia que existe entre voltaje terminal y el voltaje debido a la resistencia interna del acumulador (Figura 5.10.b y Figura 5.10.c) al aplicar las ecuaciones 5.4 y 5.5.

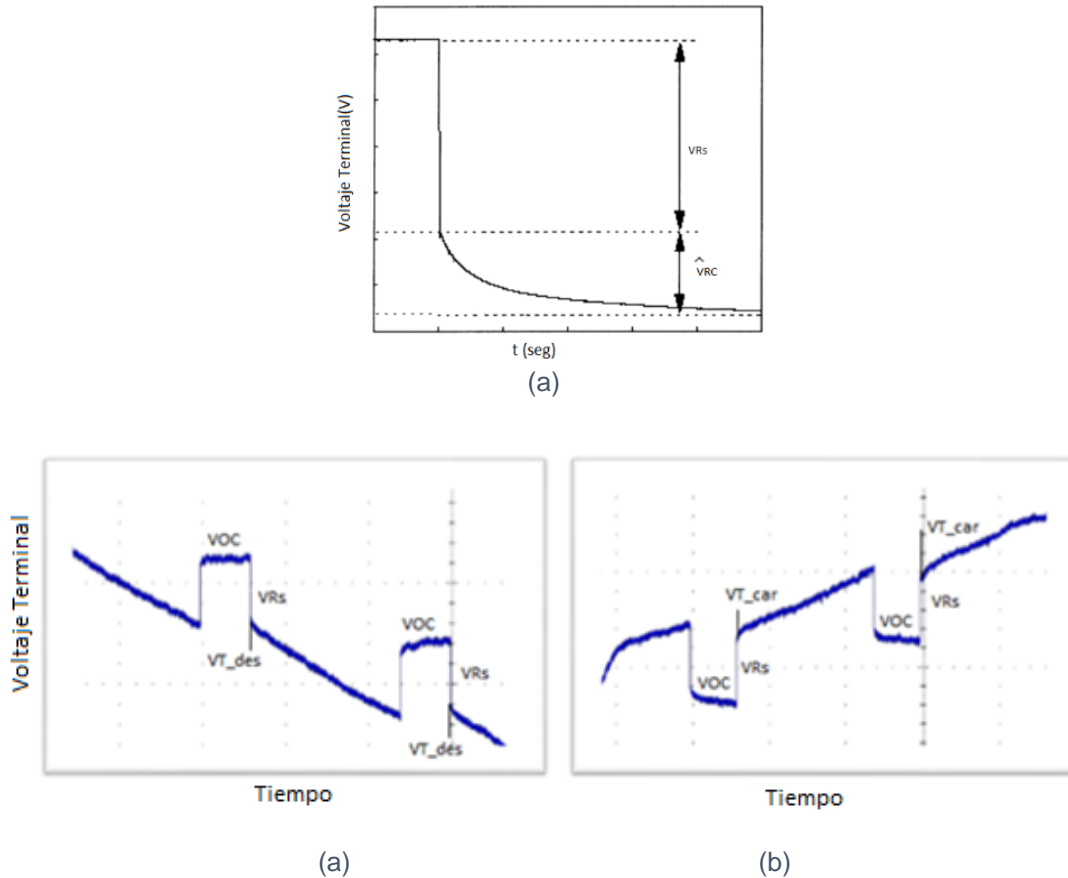


Figura 5.10: Volteje terminal de un acumulador.

a) Efecto transitorio en el volteje terminal de un acumulador.

b) Voltaje terminal ante impulsos de corriente.

Fuente: [41]

$$V_{OC} = V_{T_{des}} + V_{Rs} \quad (5.4)$$

$$V_{OC} = V_{T_{car}} - V_{Rs} \quad (5.5)$$

Al obtener los valores del voltaje de circuito abierto para cada variación del voltaje terminal, que está en función del SoC del acumulador, se obtiene una curva que representa el voltaje de circuito abierto calculado (VOC) (Figura 5.11).

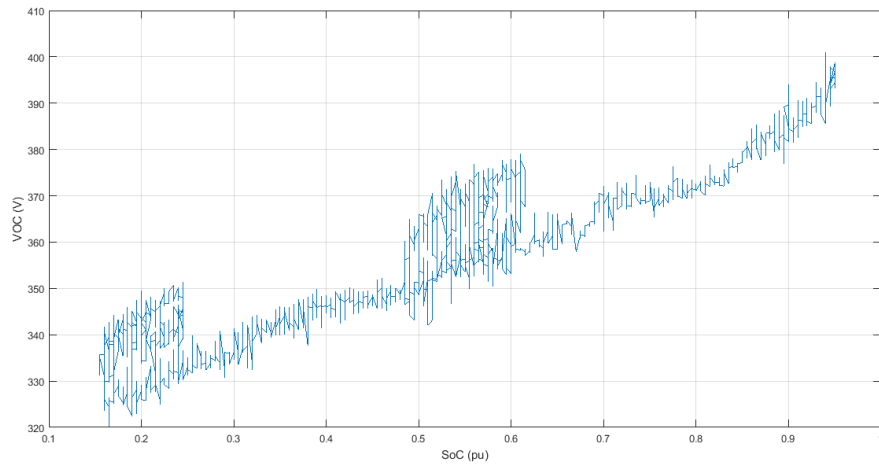


Figura 5.11: Voltaje de Circuito Abierto Calculado.

Debido a que los valores del voltaje de circuito abierto que se han calculado son muy dinámicos en todo el rango del SoC considerado, se opta por realizar el ajuste de esta curva con dos ecuaciones (de primer y sexto orden) con el fin de conseguir aproximación más real y estable, que tenga el comportamiento de las curvas características de voltaje de circuito abierto. Al realizar un promedio de estas dos curvas ajustadas, se obtiene una la curva final que describe el comportamiento del voltaje de circuito abierto del módulo acumulador (Figura 5.12).

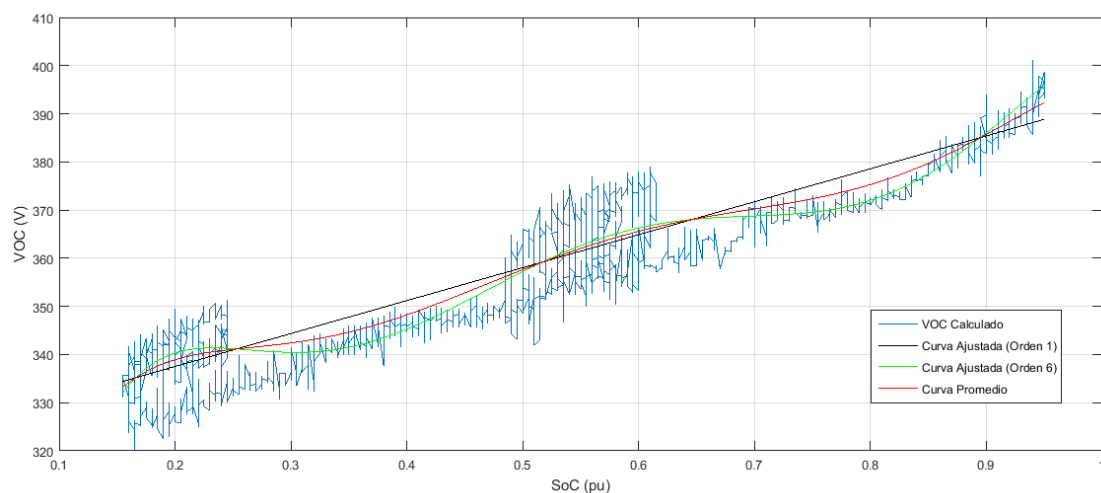


Figura 5.12: Voltaje de Circuito Abierto Ajustada del Banco.

La ecuación 5.6 corresponde a la curva promedio, la cual describe el comportamiento del voltaje de circuito abierto de la batería.

$$V_{OC_{PROMEDIO}} = 200,67 + 1981,24 * SoC - 11146,9 * SoC^2 + 31376,5 * SoC^3 - 45689,0 * SoC^4 + 33066,6 * SoC^5 - 9392,22 * SoC^6 \quad (5.6)$$

5.3.4 Planteamiento del Modelo para el software Simulink

El modelado del acumulador se lo realiza en el software Simulink, la razón por la que se hace uso de esta herramienta de simulación es por las prestaciones que posee en simulaciones de modelos dinámicos, ya que el modelo propuesto en este estudio está definido por ecuaciones electrotécnicas que Simulink puede implementar con facilidad.

En este modelado se toman consideraciones que fueron tomadas en [26], en el cual se implementó en Simulink el modelo propuesto en el estudio realizado en [28].

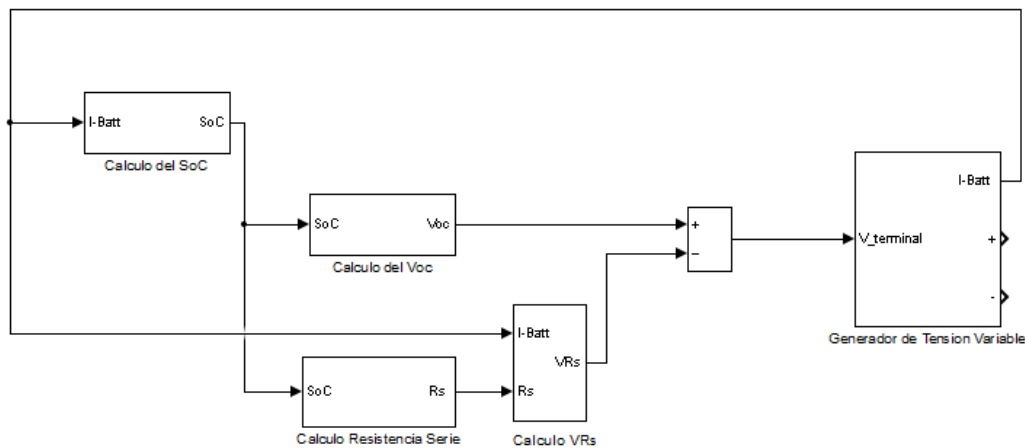


Figura 5.13: Esquema de subsistemas del modelo propuesto para Simulink.

El modelo propuesto para el banco acumulador del VE Kia Soul se subdivide en cinco subsistemas (Figura 5.13), tres de ellos corresponden al cálculo de los parámetros propios del modelo del banco acumulador analizado, estos son: SoC , V_{OC} y R_s ; el primero de ellos está en función de la corriente que el banco experimenta (carga o descarga), mientras que los restantes están función del SoC del elemento. Los dos subsistemas restantes, sirven para el cálculo de la caída de voltaje en los parámetros del modelo y para realizar la diferencia entre el voltaje de circuito abierto y la caída de voltaje en los parámetros. El parámetro a obtener es el voltaje del acumulador, denominado voltaje terminal ($V_{Terminal}$).

5.3.4.1 Componentes del Modelo Propuesto en Simulink

Los componentes que conforman el modelo son implementados en Simulink de tal manera que los subsistemas plantados anteriormente se detallan a continuación.

5.3.4.1.1 Subsistema para el cálculo de SoC

Haciendo uso de la ecuación que parte del algoritmo de integración *amperios · hora*, en donde la capacidad nominal se la considera en colombios (1Ah = 3600 C); y tanto el SoC como SoC_0 están en tanto por unidad, valor el cual varía entre 0 y 1 (que corresponde al estado descargado y cargado en forma respectiva), se procede a implementar en Simulink el subsistema para el cálculo del SoC (Figura 5.14).

$$SoC = SoC_0 - \frac{1}{C_n} \int I \cdot dt = SoC_0 - \frac{1}{C_n \cdot 3600} \int I \cdot dt \quad (5.7)$$

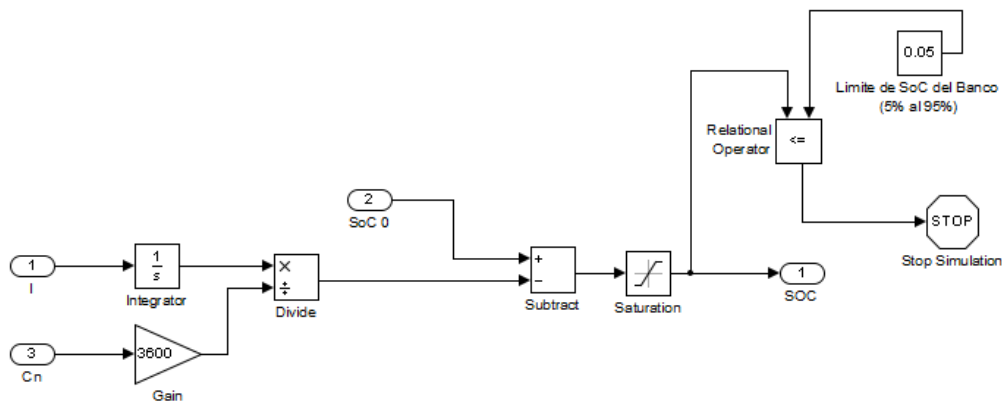


Figura 5.14: Subsistema de cálculo del SoC en Simulink.

Se introduce un filtro de valores “Saturación” que acota entre (0 y 1) el SoC, pero como se muestra en la tabla 5.1, la variación del SoC del banco analizado varía entre (5% y 95%) de tal manera que se implementa una función lógica que detiene la simulación una vez que se hayan alcanzado estos límites u otro valor definido en el cálculo del SoC.

5.3.4.1.2 Subsistema para el Cálculo de V_{OC} y R_S

Con la función “Function Block” (Figura 5.15) disponible en Simulink, es posible realizar el cálculo de los parámetros propios del modelo, este tipo de bloque permite evaluar una

función de variable única, denominada $u(x)$, por lo que tanto para el cálculo de V_{OC} y R_S , la variable de entrada será el SoC que posee el acumulador en el instante de simulación.

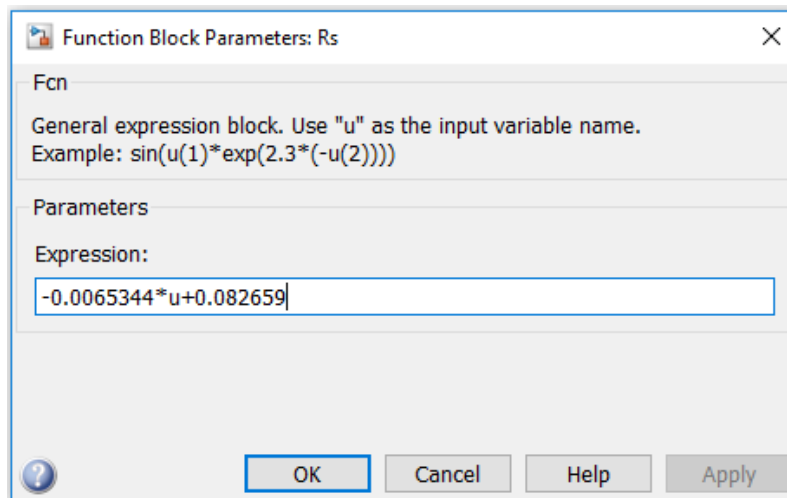


Figura 5.15: Ventana de configuración del bloque "Function Block".

5.3.4.1.3 Subsistema para el Cálculo de VR_S

Ya con los valores de los parámetros propios del modelo, se procede al cálculo de la caída de voltaje en R_S (Figura 5.16).

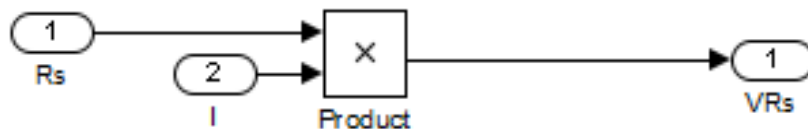


Figura 5.16: Subsistema de cálculo del VR_S en Simulink.

Con el fin de evitar errores en la simulación, se introducen límites de saturación tanto para la resistencia serie R_S , como para el voltaje terminal del acumulador $V_{Terminal}$; además de ello, se implementa otro algoritmo para detener la simulación una vez que el voltaje terminal alcance los límites establecidos del acumulador ($240V - 413V$ o puede ser también un valor definido) esto se puede ver en la Figura 5.17.

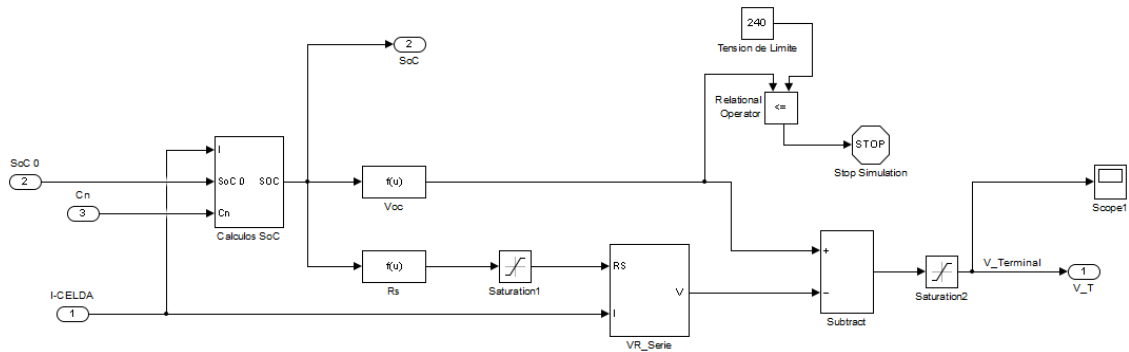


Figura 5.17: Subsistema M_ Batería.

5.3.4.1.4 Subsistema M_BATERÍA

Con un proceso similar al seguido en [26], se crea un subsistema llamado “M_BATERÍA” (Figura 5.18), en [26] la función de este subsistema es convertir la señal de tensión originada en él, en un voltaje utilizable a partir de una fuente de tensión controlada, en este estudio se realiza el mismo proceso, pero con el fin de poder exportar las curvas de las respuestas al panel principal de Matlab para poder analizarlas.

Al subsistema denominado “M_BATERÍA” se le ha incorporado además un bloque de medida de corriente, esta corriente medida es la que circula en los bornes de la batería la cual se introduce al modelo como un dato. En la Figura 5.18 se puede ver que las estradas del modelo vienen desde un bloque externo, mientras que las salidas de este subsistema son dos bornes (positivo y negativo) que equivalen a los bornes del acumulador y el SoC del elemento.

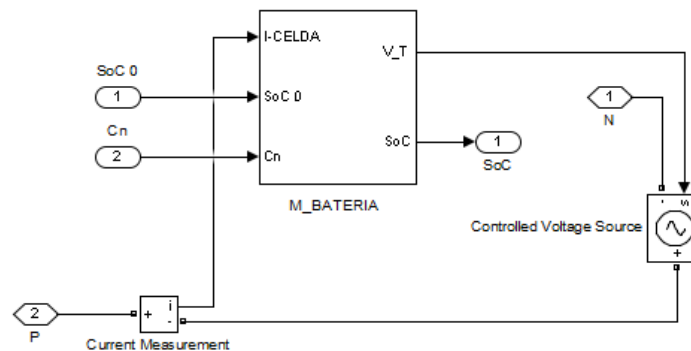


Figura 5.18: Subsistema Batería.

Finalmente, el modelo en Simulink queda como se presenta en la Figura 5.19, como se puede ver, en los bornes de la batería se ha incorporado una fuente de corriente

controlada, a la cual por medio de un bloque denominado “Señal de Corriente” se le asigna la señal a la que se someterá el acumulador.

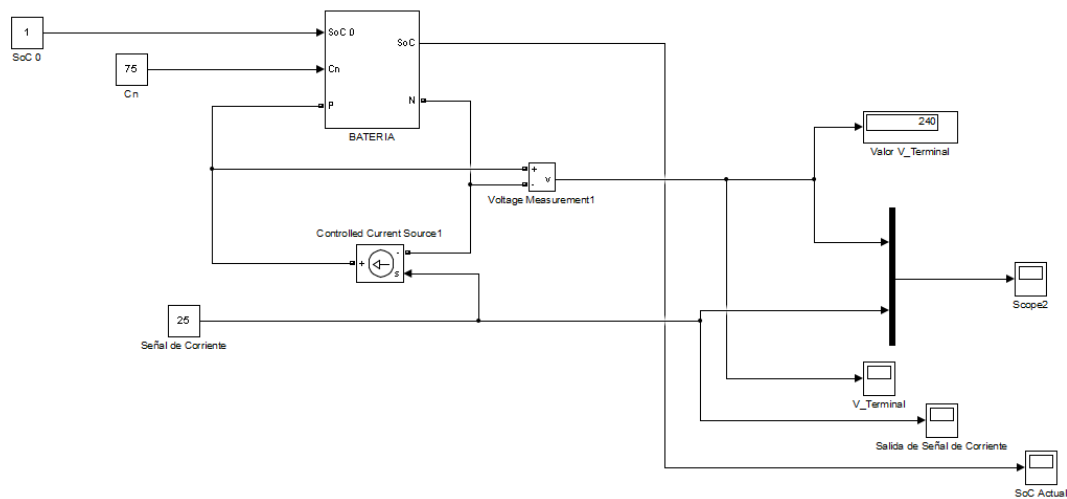


Figura 5.19: Modelo de CE “Resistencia Interna” planteado en Simulink.

Las entradas del bloque final “BATERÍA”, es el estado de carga inicial SoC_0 , la capacidad nominal C_n y la señal de corriente asignada, por su parte las salidas son el estado de carga actual SoC y el voltaje terminal $V_{Terminal}$ del acumulador que se obtiene con un medidor de voltaje. A continuación, se procede a verificar el funcionamiento del modelo.

5.3.5 Validación del Modelo

Una vez obtenidos todos los parámetros del circuito equivalente, en el modelo ya planteado en el software Simulink (Figura 5.19), se procede a simular una descarga similar a la que se le aplica en el informe realizado por el INL (Idaho National Laboratory) en el VE Kia Soul 2015 de $27kWh$.

En el informe se realiza la prueba de capacidad estática que consiste en medir la capacidad de energía de la batería entre los voltajes máximo y mínimo del banco, cuando este es descargado con una corriente constante durante tres horas ($C/3$). En el informe se realizan tres iteraciones de la prueba de capacidad estática, los resultados promedio de cada prueba se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Resumen de resultados de pruebas de laboratorio.
Fuente: [21]

Test Number	Date of Test	Measured Average Capacity (Ah)	Measured Average Energy Capacity (kWh)
Baseline	2/23/2015	85.6	30.5
ICD 1	6/3/2015	82.3	29.3
ICD 2	1/5/2016	75.7	27.0
ICD 3			
End-of-Test			

Nota: Test Number, Numero de Prueba; Date of Test, Fecha de la Prueba; Measured Average Capacity (Ah), Capacidad Promedio (Ah); Measured Average Energy Capacity (kWh), Capacidad de Energía Promedio Medida (kWh).

En el modelo se introducen todas las entradas que requiere el mismo (capacidad nominal $C_n = 75Ah$, estado de carga inicial $SoC_0 = 1pu$ y la señal de corriente $I = 25A$).

En la Figura 5.20. se presentan los valores de tensión en los terminales del banco, los cuales se obtienen en la simulación y los presentados en el informe de INL. El modelo presenta un error máximo 2,85% con respecto al resultado mostrado por INL, se puede ver además que el modelo sufre una saturación para valores mayores a los 395V, esto se debe a que la ecuación que describe el comportamiento del voltaje de circuito abierto del banco tiende a saturarse en esta zona, debido a que los sistemas de protección del vehículo no permite cargas superiores a estos valores de voltaje, ya que los datos obtenidos con el programa para la adquisición de información, indican que los 395V corresponden al 95% del SoC en los sensores acoplados al banco y el 100% del SoC en el display del tablero del vehículo.

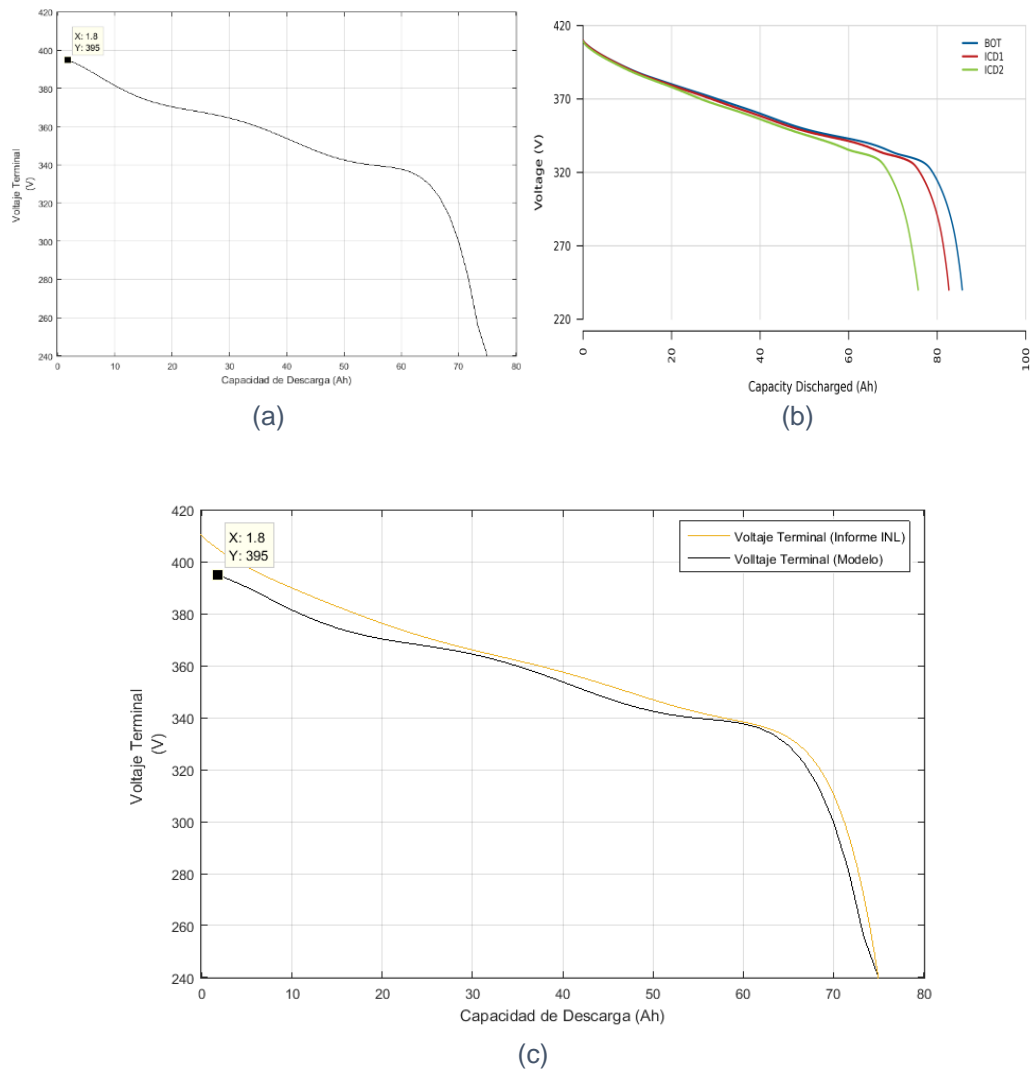


Figura 5.20: Resultados del modelo para el banco acumulador del VE Kia Soul.
a) Resultado del modelo de esta investigación. b) Resultado en el informe del INL.
c) Comparación de los dos resultados.

Nota: Voltage (V), Voltaje (V); Capacity Discharged (Ah), Capacidad de Descargada (Ah).

5.4 Modelado de Celdas Acumuladoras de Energía Eléctrica

En esta sección se realizará el modelado de las celdas acumuladoras de energía de la marca Samsung SDI de 68Ah y A123 Systems de 20Ah. Al tratarse únicamente de celdas y no de un banco acumulador, el modelado se realizará con los circuitos equivalentes recopilados de la literatura científica revisada en el capítulo 4, estos son:

- Modelo Equivalente de Resistencia Interna (R_{int}).
- Modelo Equivalente de Thévenin.
- Modelo PNGV.
- Modelo de Circuito Equivalente Propuesto por Chen 2006.
- Modelo de Circuito Equivalente Propuesto por S.P Castaño Solís.

Lo común entre estos modelos de circuitos equivalentes, es que el proceso de modelado y obtención de los parámetros son muy similares. En el proceso de parametrización se considera una de las técnicas de modelado en el dominio de tiempo, en forma puntual el proceso que consiste en la interrupción de corriente (revisada en el apartado 3.5.1.2), a continuación, se presenta una descripción de las celdas a modelar, el planteamiento de los modelos en Simulink, el proceso experimental que se ha seguido para la obtención de los datos y el proceso de obtención de los parámetros.

5.4.1 Descripción de las Celdas Acumuladoras a Modelar

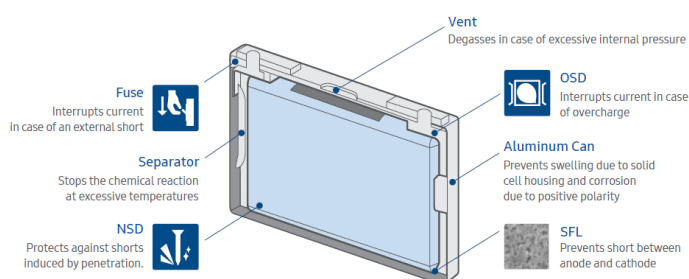
Caso A) Celda Samsung SDI de 68Ah: Este tipo de celda es “Prismática” (Figura 5.21.b). Para el modelado de esta celda en este estudio se ocupó una celda que conforma un módulo 16S1P de 68Ah (Figura 5.21.a) que está disponible en el Laboratorio de Micro redes de la Universidad de Cuenca, la celda tiene un peso de 1,910kg y sus dimensiones son: 173,9 mm de ancho; 45,6 mm de profundidad y 125,7 mm de alto. Tiene una estimación de rendimiento del 100% al 80% de su capacidad con 6000 ciclo a temperaturas de 25°C en descargas de 1C. Su degradación natural del 100% (68Ah) al 80% está alrededor de 3,3 y 22,9 años a una temperatura ambiente de 60°C y 25°C respectivamente. Al tratarse de una celda de alta densidad de energía cuenta con dispositivos de seguridad incorporados (Figura 5.21.c). Son aplicables a vehículos eléctricos tipo VEB, así como en módulos acumuladores tipo estacionarios. En la tabla 5.3 se presentan los parámetros de esta celda. Pueden soportar corrientes de carga o descarga de 4C durante cinco minutos con tiempos de reposo de 2 horas cuando son ensamblados en módulos estacionarios.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.21: Características de la Samsung SDI de 68Ah.

- a) Banco acumulador Samsung SDI 16S1P de 68Ah.
 b) Celda Samsung SDI de 68Ah. c) Estructura de la celda Samsung SDI de 68Ah.

Nota: Fuse, Fusible (interrumpe la corriente en caso de un cortocircuito externo); Separator, Separador (Detiene la reacción química a temperaturas excesivas); Dispositivos de seguridad de clavos NDS (Protege contra cortocircuitos inducidos por penetración); Vent, Ventilación (Ventilación en caso de una presión interna excesiva); Dispositivo de seguridad de sobrecarga OSD (Interrumpe la corriente en caso de sobrecarga); Aluminum Can, Lata de Aluminio (Evita la hinchazón debido a la carcasa de la celda sólida y la corrosión debido a la polaridad positiva); Capa funcional de seguridad SFL (Evita cortocircuitos entre el ánodo y el cátodo).

Tabla 5.3: Parámetros de la celda Samsung SDI de 68A.

PARÁMETRO	VALOR
Capacidad	68Ah
Voltaje Nominal	3,70V
Rango de Voltaje	2,7 V-4,1V
Energía Nominal	251,6Ah
Energía Específica (1C-25 °C)	123 Wh/kg
Rango de temperatura en operación	-25°C a 50°C
Rango de temperatura en reposo	-40°C a 60°C
Densidad de Energía (1C- 25 °C)	259Wh/L
Materia Activo	(+) Mezcla de NCM/LMO (-) Grafito Natural
Separador	PP/PE
Electrolito	EC/EMC/DMC, Aditivos LiFP6
Cantidad de electrolito	Max. 348 g/ml / Max.283 g/ml

Caso B) Celda A123 Systems modelo AMP20M1HD-A: El tipo de celda al que corresponde este acumulador por su diseño de construcción es al del tipo “Pouch” (Figura 5.22), tiene un peso de 496g, con dimensiones de 160mm de ancho; 7,25 mm de profundidad y 227mm de alto. Está destinado para aplicaciones de vehículos tipo VEHP, VE, módulos estacionarios, pero por la densidad de energía que ofrece tiene mayor aplicación en vehículos eléctricos tipo “micro híbridos”. Tiene una estimación de rendimiento del 100% al 90% de su capacidad con 3000 ciclo a temperaturas de 23°C en descargas de 1C. Su química corresponde al tipo “fosfato de hierro de litio LiFePO_4 ” en el cátodo. En la tabla 5.4 se presentan los parámetros de esta celda tipo Pouch.



Figura 5.22: Celda A123 modelo AMP20M1HD-A.

Tabla 5.4: Parámetros de la celda A123 modelo AMP20M1HD-A.

PARÁMETRO	VALOR	COMENTARIOS
Capacidad	20Ah	
Capacidad Mínima	19,5Ah	25 °C, Descarga a 6 A, 3,6V a 2V (Comienzo de la vida)
Voltaje Nominal	3,3V	50% SoC
Rango de Voltaje	2V-3,8V	Descarga Completa Carga Completa
Voltaje Terminal Máximo Absoluto	4,0V	Para valores mayores se genera daños absolutos a la celda
Rango de temperatura en operación	-30°C a 55°C	
Rango de temperatura en reposo	-40°C a 60°C	
Energía Nominal	65Wh	
Energía Específica (1C-25°C)	131Wh/kg	
Densidad de Energía (1C-25°C)	247Wh/L	

5.4.2 Planteamiento de los Modelos en Simulink

5.4.2.1 Planteamiento de los Modelos de Thévenin y Chen

Partiendo del modelo de resistencia interna planteado en el apartado 5.3.4 para el modelado del banco acumulador, se plantea en Simulink el modelo de Thévenin y el propuesto en Chen 2006. La red RC en serie que diferencia al modelo de Thévenin del modelo de resistencia interna se considera para la caracterización de la respuesta del acumulador al transitorio corto (polarización por activación). Por otra parte, en el modelo de Chen 2006, se considera una red RC adicional al modelo de Thévenin, esto es con el fin de realizar la caracterización de la respuesta del acumulador al transitorio largo (polarización por concentración). Estos dos circuitos equivalentes sirven para reproducir la respuesta del voltaje del acumulador en sus terminales. Por su parte el algoritmo para la estimación del estado de carga (*SoC*) se considerará de igual forma que en el apartado 5.3, el basado en la integración *amperios · hora*.

En la Figura 5.23 se presenta el esquema de los subsistemas adicionales al esquema planteado para el modelo de resistencia interna. Para el caso específico del modelo de Thévenin se consideran dos subsistemas adicionales, estos corresponden al cálculo de los parámetros propios del banco (RC_{T_Corto} que están en fundición del *SoC*), mientras que el segundo subsistema restante corresponde al cálculo del voltaje que se pierde en la red RC que caracteriza el transitorio corto. Por otra parte, en el planteamiento en Simulink del modelo de Chen 2006, se considera una red RC adicional al modelo de Thévenin, esta red sirve para caracterizar la respuesta del acumulador al transitorio largo (RC_{T_Largo} que están en fundición del *SoC*) por lo que se considera dos subsistemas adicionales al modelo de Thevenin en el esquema. En síntesis, el esquema para el modelo de Thévenin consta de siete subsistemas mientras que para el modelo de Chen 2006 consta de nueve subsistemas.

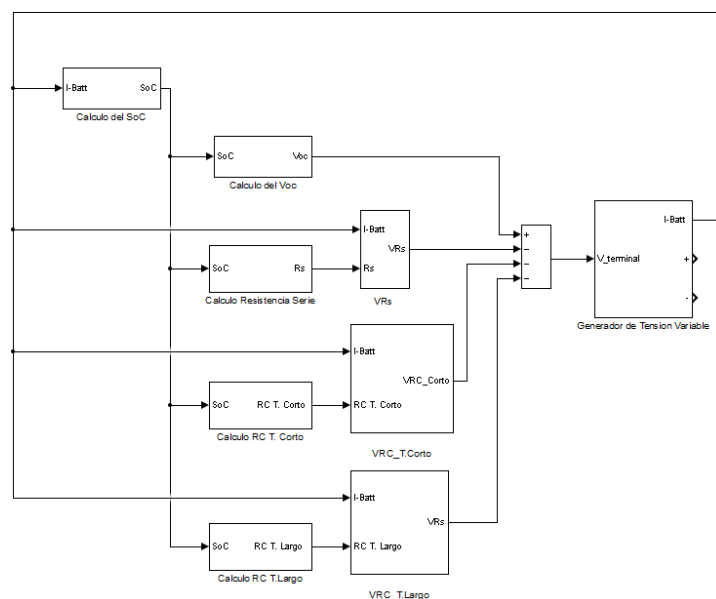


Figura 5.23: Esquema de subsistemas del modelo propuesto para Simulink (Chen 2006).

5.4.2.1.1 Subsistemas de cálculo *RTC*, *RTL*, *CTC* y *CTL*

Los subsistemas para el cálculo de los nuevos parámetros propios del acumulador, hacen uso del bloque “Function Block” en Simulink al igual que el procedimiento del apartado 5.3.4.1.2.

5.4.2.1.2 Subsistema para el Cálculo de *VRC_T.Corto* y *VRC_T.Largo*

El cálculo de los dos subsistemas (de la caída de voltaje en las redes RC) son similares. La ecuación 4.23 describe el comportamiento eléctrico de la red RC, la cual reproduce el comportamiento transitorio (sea corto o largo) del acumulador. Las caídas de voltaje en las redes RC se expresan en Simulink de la manera como se ve en la Figura 5.24. La entrada de cada subsistema es la corriente que circula por la celda y el valor de los componentes en cada caso. La salida es la caída de tensión o polarización en la red RC.

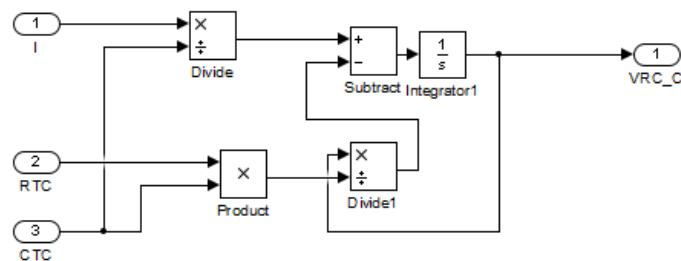


Figura 5.24: Subsistema para el cálculo de la polarización en las redes RC.

5.4.2.2 Planteamiento del Modelo PNGV

Al igual que el modelo de Chen, este modelo consta de nueve subsistemas, la diferencia es que los dos últimos no tienen la misma función. En lugar de determinar los parámetros de la red RC para el transitorio largo del modelo de Chen 2006, en el modelo PNGV, estos dos subsistemas se emplean para el cálculo del capacitor en serie y para el cálculo de la caída de voltaje en el interior del capacitor.

5.4.2.2.1 Subsistema para el Cálculo de *C_Serie*

En la revisión bibliográfica del modelo PNGV, el valor del capacitor en serie que describe la variación del voltaje de circuito abierto, depende directamente del valor del voltaje de circuito abierto en el modelo, donde su valor es $1/U'_{OC}$, este proceso en Simulink se implementa de la manera que se evidencia en la Figura 5.25.

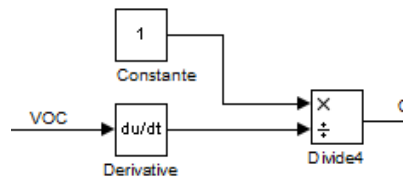


Figura 5.25: Subsistema para el cálculo Capacitor Serie.

Nota: Derivative, Derivado; Divide, Divisor.

5.4.2.2.2 Subsistema para el Cálculo de VC_{Serie}

Para el cálculo de la caída de voltaje en el capacitor en serie del modelo PNGV se aplica una simple ecuación que describe el voltaje en un capacitor (Figura 5.26).

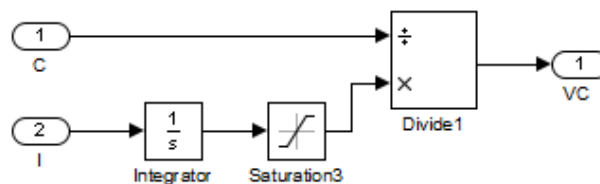


Figura 5.26: Subsistema para el cálculo del voltaje en el “Capacitor Serie.”

Nota: Integrator, Integrador; Saturation, Saturación; Divide, Divisor.

5.4.2.3 Planteamiento del Modelo S.C Modificado

El modelo de circuito equivalente presentado en [24], para la caracterización de un banco acumulador, tiene la particularidad de no considerar una fuente de voltaje dependiente del SoC para representar la fuente de voltaje en circuito abierto como en los otros modelos propuestos. En este estudio no se considera este procedimiento y se modela como en todos los modelos propuestos. Sin embargo, el procedimiento para el cálculo del capacitor serie que plantea el modelo propuesto en [24], si es considerado, por lo que para el planteamiento en Simulink del cálculo de valor del capacitor y su voltaje se consideran los procedimientos llevados a cabo en las secciones 5.4.2.2.1 y 5.4.2.2.2 pero esta vez considerando como entrada al subsistema del apartado 5.4.2.2.1 el SoC y no el VOC .

5.4.2.4 Planteamiento del Modelo de una Banco a partir de Celdas Considerando la Propuesta de Kim 2013

En el capítulo cuatro (apartado 4.7) de la revisión bibliográfica el modelo propuesto por [35], plantea el modelado de un banco acumulador, con una configuración de celdas en

serie, las cuales deben ser previamente seleccionadas, para que con ello el módulo este conformado por celdas con las características de resistencias y capacidades similares.

Aunque este modelado es aplicable para módulos con configuraciones en serie, se plantea para el caso de módulos que tengan configuraciones de serie-paralelo. Para ello se realiza la división de corrientes para el número de ramas en paralelo que posea el módulo, de tal manera que el valor de la corriente se verá interferido solamente por el número de ramas en paralelo que conformen el módulo.

La propuesta de [35] para el modelado de módulos a partir de celdas en serie y la consideración para la división de corrientes para el número de ramas en paralelo, han sido aplicadas en el trabajo propuesto en [26], el cual ha dado buenos resultados. En este estudio se considera que las celdas son ideales y tiene las mismas características electroquímicas, de tal manera que se cumplen con estos requerimientos; de forma que se hace posible la aplicación de estas técnicas. En las Figuras 5.27, 5.28 y 5.29 se presentan los modelados finales para el modelo propuesto por Chen 2006, PNGV y S.C Modificado respectivamente. El modelo de Resistencia Interna y Thévenin se obtienen al no considerar los parámetros propios del módulo que se propone en el modelo de Chen 2006. Para el modelo de resistencia interna, no se consideran los procedimientos necesarios para *RC T.Corto* y *RC T.Largo*. Mientras que para el modelo de Thévenin no se considera únicamente el procedimiento requerido para *RC T.Largo*.

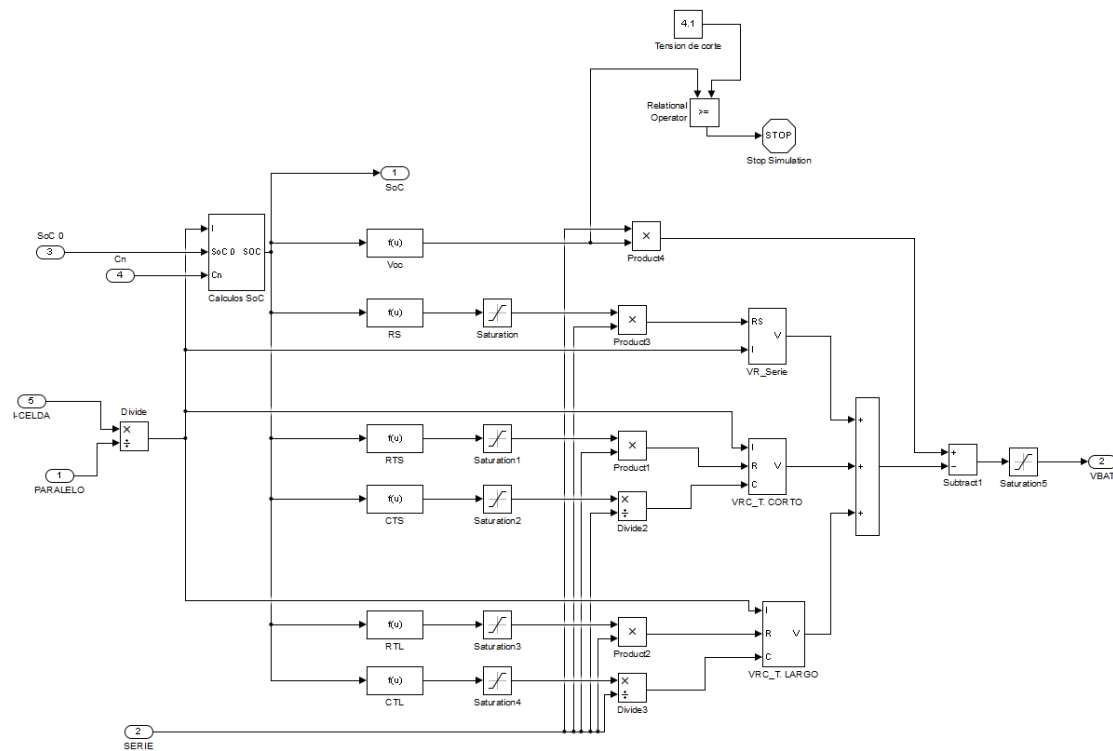


Figura 5.27: Modelo en Simulink del CE Chen 2006.

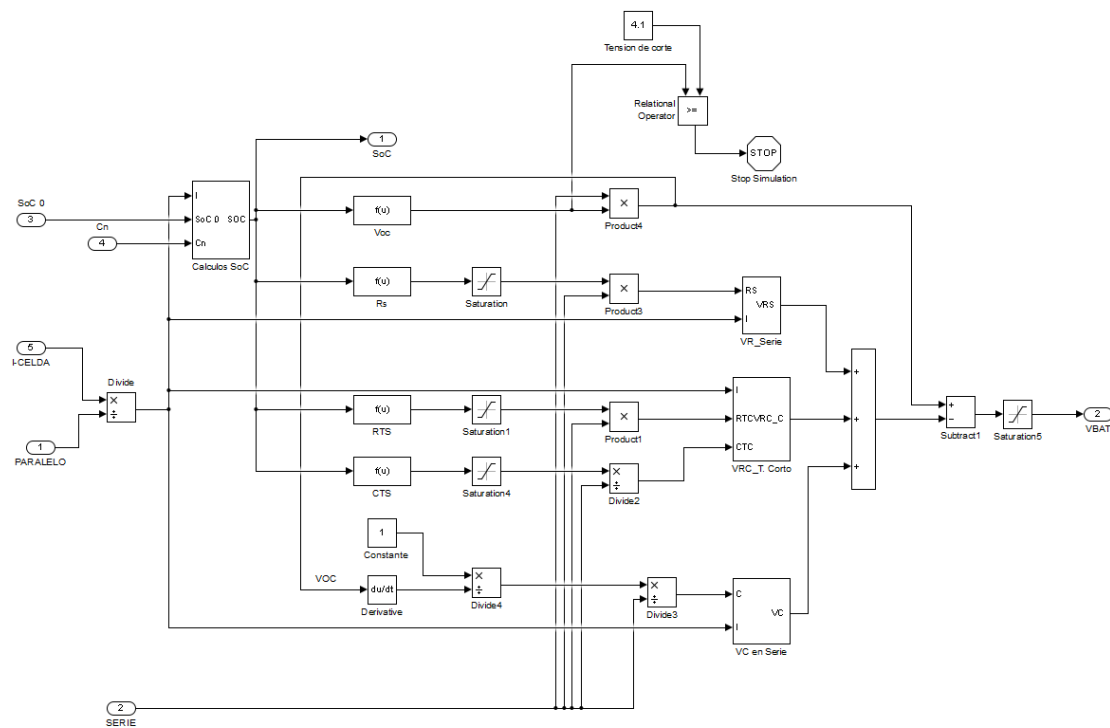


Figura 5.28: Modelo en Simulink del CE "PNGV".

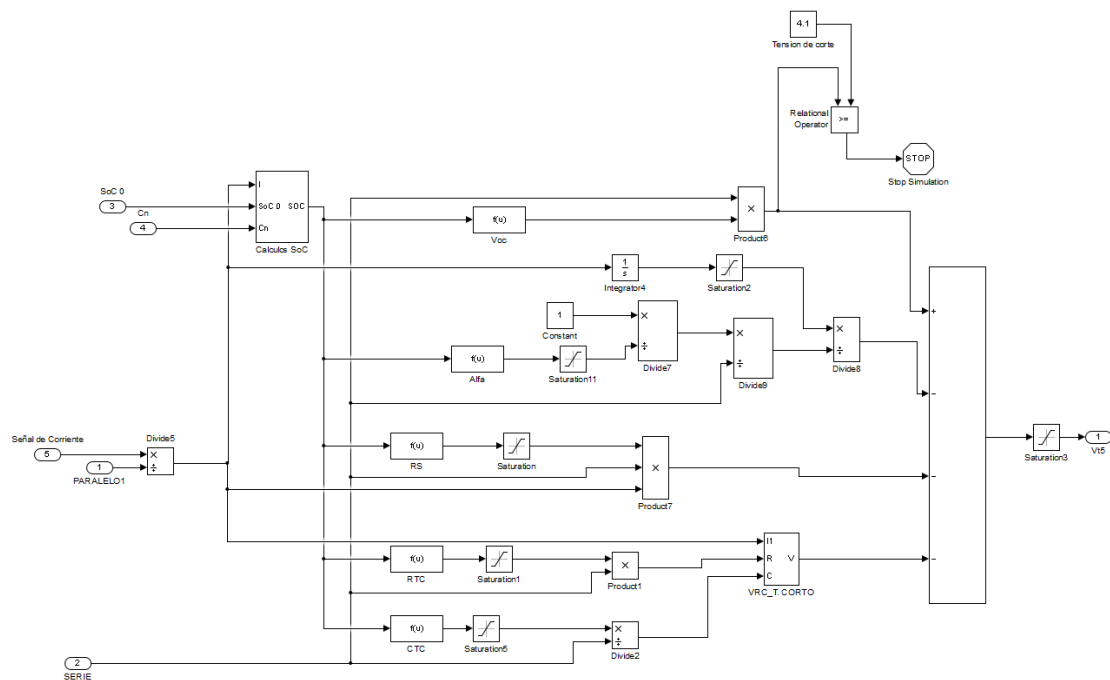


Figura 5.29: Modelo en Simulink del CE S.C Modificado.

5.4.2.5 Subsistema denominado M_CELDA y BATERÍA

Al igual que en el apartado 5.3.4.1.4, se crea un subsistema ahora denominado M_Celda que abarca a todos los parámetros propios de la celda y los cálculos de los voltajes. Las entradas adicionales de este subsistema es el número de celdas en serie y el número de ramas en paralelo que tiene el banco acumulador (Figura 5.30.a). Con el mismo proceso explicado en el apartado 5.3.4.1.4 se obtiene el bloque final “BATERÍA” del modelo implementado en Simulink, el cual tiene como entradas de estado de carga inicial SoC_0 , la capacidad nominal C_n , la señal de corriente asignada, el número de celdas conectadas en serie y el número de ramas que posee el módulo a modelar. Por su parte las salidas son el estado de carga actual SoC y el voltaje terminal $V_{Terminal}$ del acumulador que se obtiene con un medidor de voltaje. El modelo completo se ilustra en la Figura 5.30.b.

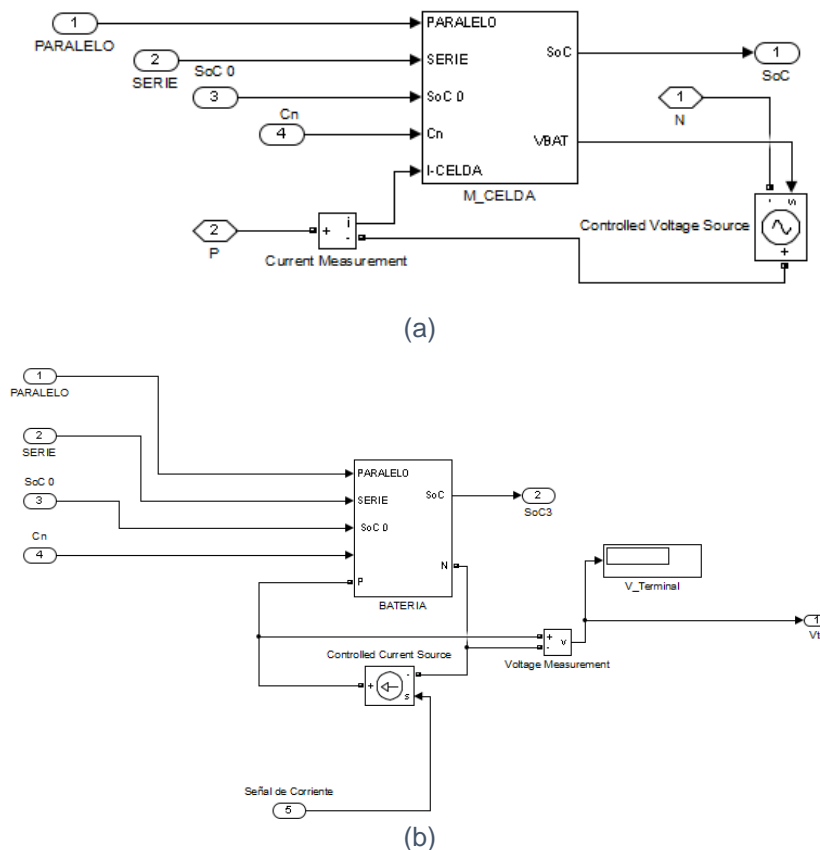


Figura 5.30: Bloque final de los modelos implementados en Simulink.
a) Subsistema de Batería. b) Bloque final de los Modelos.

Se ha implementado en simulink cinco modelos que se han tomado de la literatura científica revisada en el capítulo 4. Con el fin de determinar el que mejor reproduce el comportamiento del acumulador analizado, se ha creado como bloques cada uno de ellos, los cuales tendrán como entradas, los mismos parámetros. En la Figura 5.31 se ilustra la configuración final de los modelos planteados en Simulink.

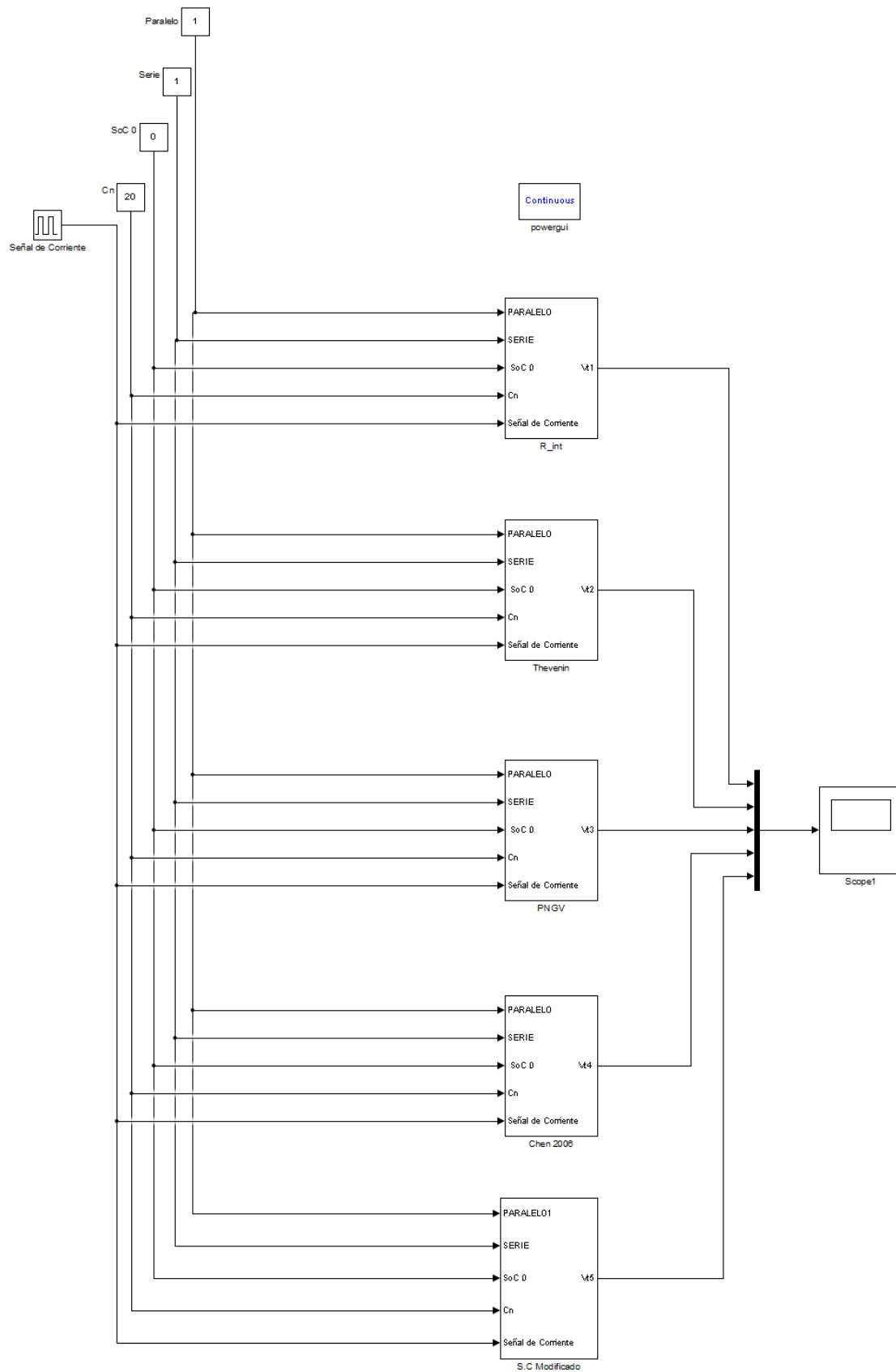


Figura 5.31: Bloques de modelos planteados en Simulink.

5.4.3 Proceso experimental para la determinación de los Circuitos Equivalentes de los Acumuladores por la técnica de Interrupción de Corriente

De las diferentes técnicas para determinar un circuito equivalente de un acumulador de Ion Litio, revisadas en la literatura científica en el capítulo 3, la técnica de interrupción de corrientes es la que más se emplea. Por ejemplo, en los trabajos presentados en [28] [42], este proceso se aplica solo para el proceso de carga o descarga. En [43] se aplica esta técnica solo para cierto intervalo de variación del *SoC*. Un trabajo que aplica esta técnica para los procesos de carga y descarga en todo el intervalo de funcionamiento del módulo es el presentado en [24].

La técnica de interrupción de corriente consiste en aplicar al acumulador ya sea una secuencia de pulsos de carga (PC) o pulsos de descarga (PD) constantes con un tiempo de reposos entre ellos. Los experimentos deben cubrir las tasas típicas del perfil de carga previsto para proporcionar resultados precisos, por lo que la duración de los tiempos de prueba, tiempos de descanso y el número de pulsos son muy importantes para conseguir la precisión deseada [44]. Generalmente, los tiempos de descanso oscilan entre 5 y 60 minutos y las frecuencias de pulso entre el 2% y 20%.

En este estudio la determinación de los circuitos equivalentes de las celdas acumuladoras propuestas, se desarrolla para todo el intervalo de variación del *SoC*, pero para el proceso de carga, con una frecuencia de pulsos de alrededor del 8% y 10 % aproximadamente para la celda Samsung y A123 (modelo (AMP20M1HD-A)) respectivamente, el tiempo de relajación fue de 10 minutos, para los dos acumuladores analizados. El proceso que se llevó a cabo se describe en las siguientes secciones.

5.4.3.1 Descripción del Procedimiento Experimental

Celda Samsung SDI de 68Ah: Esta celda se descargó con una corriente aproximada a los 3A, hasta alcanzar un voltaje terminal de 2,7V. Este proceso se realiza considerando las condiciones de la data técnica, en la cual se especifica que una celda se considera totalmente cargada cuando alcanza 4,1V en sus terminales con una corriente de 3A. En este estudio se considera para el proceso de descarga, en la cual se consigue un voltaje de circuito abierto de 3,1V después de un tiempo de relajación de 30 minutos. Una vez alcanzado 3,1V en el voltaje de circuito abierto, se inició el proceso de carga por pulsos, aplicando una corriente de 12A por un tiempo de 30 minutos (correspondiente al 8,8% de la capacidad), el tiempo de relajación fue 10 minutos, se cargó el acumulador hasta alcanzar un voltaje terminal de 4,1V y de circuito abierto de 4,033V. La respuesta del acumulador al proceso de carga por pulsos se puede ver en la Figura 5.32.

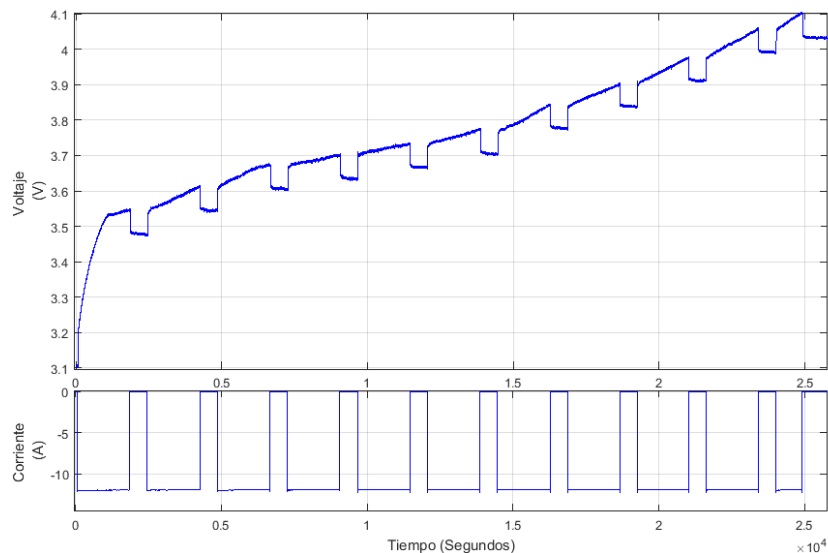


Figura 5.32: Proceso de carga por Pulsos para la Celda Samsung SDI de 68 Ah.

Celda A123 Systems modelo AMP20M1HD-A: Con un proceso similar al proceso de estabilización que se dio al acumulador Samsung SDI de 68 Ah, esta celda se descargó con una corriente aproximada de 2A, hasta alcanzar un voltaje terminal de 2V y un voltaje en circuito abierto de 2,6V. Después de un tiempo de relajación de 30 minutos se inició el proceso de carga por pulsos. Se aplicó una corriente de 4A por 30 minutos con un tiempo de relajación de 10 minutos hasta alcanzar un voltaje terminal de 3,95 V, evitando llegar al voltaje que provoca daños permanentes al acumulador ($> 4V$), en este proceso se consigue un voltaje de circuito abierto de 3,80V. La respuesta del acumulador al proceso de carga por pulsos se puede ver en la Figura 5.33.

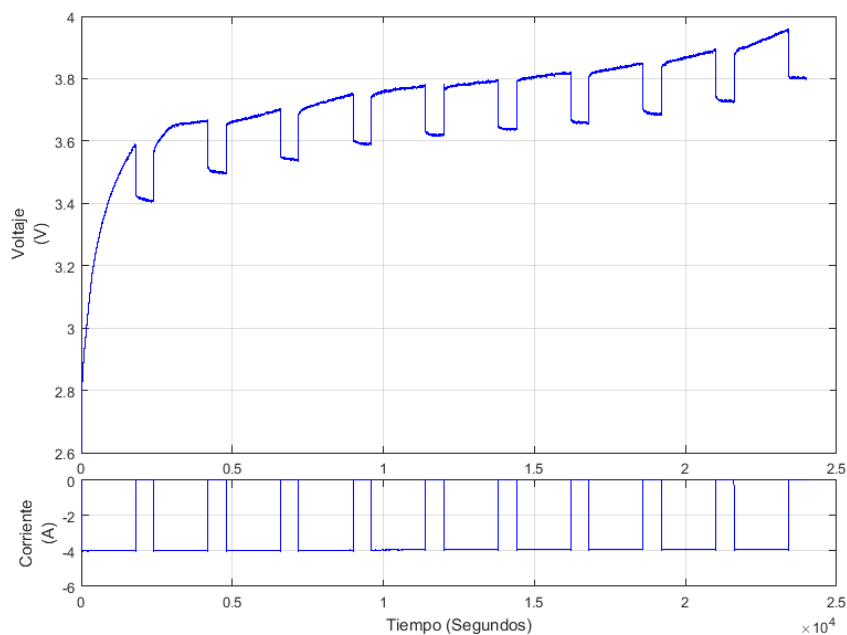
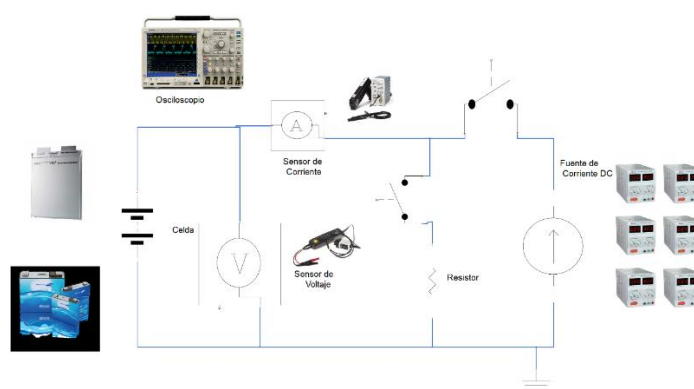


Figura 5.33: Proceso de carga por Pulsos para la Celda A123 (AMP20M1HD-A).

5.4.3.2 Montaje de los equipos para el proceso experimental

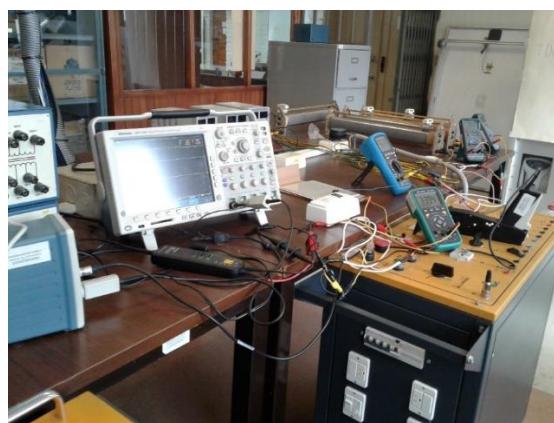
El montaje de los equipos utilizados para llevar a cabo el experimento se presenta en la Figura 5.34. La fuente de corriente continua que se utiliza para cargar los acumuladores es una combinación en paralelo de seis fuentes de corriente continua de 3A. Se utiliza un Stwich para generar los pulsos al abrir y cerrar el paso de la corriente (tanto para la fuente de corriente y para los reóstatos). La adquisición de datos se la realiza con el osciloscopio modelo DPO 4104, una sonda de corriente TCP303 y sonda de tensión P5200A de la marca Tektronix. El osciloscopio se configuró para que la adquisición de la información se la realice cada centésima de segundo, es decir 100 muestras por segundo, de tal manera que la adquisición de datos es precisa.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.34: Sistema de pruebas.

- a) Esquema del sistema de pruebas.
- b) Montaje del sistema de pruebas con la celda Samsung SDI de 68Ah.
- c) Montaje del sistema de pruebas con la celda A123 (AMP20M1HD-A).

Al no disponer de una fuente de corriente que genere los pulsos para cargar al acumulador en forma automática, se integra la corriente con respecto al tiempo, haciendo uso de la técnica de integración del trapecio [45], con el fin de determinar la capacidad cargada del acumulador en cada rango de tiempo en que se aplica el pulso de carga. Debido a que la velocidad de adquisición de información es muy precisa resulta óptimo este procedimiento.

5.4.4 Análisis de Resultados

El método de identificación de los elementos de los circuitos equivalentes propuestos, se basa en el análisis de las características de relajación de la tensión, durante los periodos de descanso de las pruebas de caracterización en los pulsos de carga (PC) experimentales tal como en los estudios desarrollados en [44] y [46]. Los periodos de descanso bajo investigación se dividen en ventanas de tiempo separadas que se utilizan para identificar los parámetros de los modelos correspondientes.

De los modelos de circuitos equivalentes propuestos de este estudio, el más completo es el propuesto por Chen 2006, por lo que una vez que se parametrize este circuito equivalente, los modelos como el de Resistencia Interna, Thévenin y PNGV por defecto se parametrizan ya que estos tres últimos modelos son un complemento o tiene en común ciertos elementos con el modelo de Chen 2006. Por otra parte, está la identificación el capacitor serie que se propone en el modelo realizado en [24], proceso el cual es adicional en el modelado.

Partiendo de la ecuación 4.17 (ajustada en el dominio del tiempo para predecir el *SoC* del acumulador bajo corrientes dinámicas), que representa el comportamiento eléctrico del modelo de Chen 2006, se procede a la parametrización del mismo.

$$V_{Terminal} = V_{OC} - I(t) * R_S - I(t) * R_{TC} * \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{TC} * C_{TC}}}\right) - I(t) * R_{TL} * \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{TL} * C_{TL}}}\right) \quad (5.8)$$

5.4.4.1 Cálculo de los Parámetros de los Circuitos Equivalentes

La capacidad utilizable que el autor propone en el modelo de Chen 2006 (ecuación 4.14), es la capacidad que se tiene entre los límites de voltaje del acumulador, la cual depende de factores correctores como el número de ciclos y la temperatura. En este trabajo se propone hacer uso de la capacidad dada por el fabricante; debido a que todas las celdas al salir de un mismo proceso de evaluación (de la fábrica) deben cumplir las mismas características, además, de que se hacen uso de celdas completamente nuevas en una temperatura de laboratorio de 23°C por lo que los dos factores de corrección se simplifican al valor de 1. La capacidad del acumulador dada por el fabricante será considerada entonces como el 100% del *SoC*.

Extrayendo la ventana de la respuesta del voltaje del acumulador en el periodo de relajación, se obtiene un perfil del voltaje de la forma que se presenta en la Figura 5.35. Con el fin de tener en cuenta la influencia del *SoC* del acumulador sobre los parámetros que conforman los circuitos equivalentes, los parámetros se calculan para cada valor de la prueba en el proceso de carga.

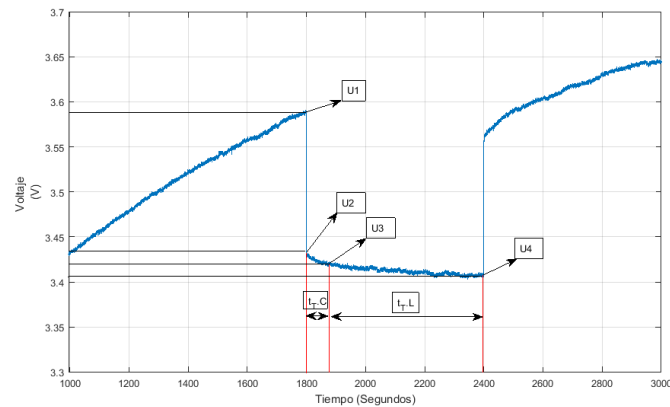


Figura 5.35: Características de voltaje de relajación en el periodo de carga.

La resistencia serie se calcula a partir del cambio instantáneo de tensión que se produce al final de cada pulso de corriente.

$$R_S = \frac{U_1 - U_2}{I} \quad (5.9)$$

Para la parametrización de las redes RC que reproducen el comportamiento “Transitorio Corto” y “Transitorio Largo” de la respuesta del voltaje del acumulador, se parte de la teoría básica de un capacitor en paralelo con una resistencia. De tal manera que se hace uso de la constante de tiempo “ τ ” para expresar la rapidez con la cual la tensión cambia. Esta constante de tiempo es el tiempo requerido para que la respuesta cambie en un factor de $1/e$, o 36,8% de su valor inicial (Figura 5.36).

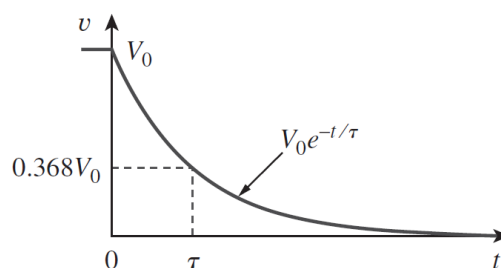


Figura 5.36: La respuesta en tensión del circuito RC.
Fuente [47]

Haciendo uso de las ecuaciones 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 se calculan los valores de R_{TC} , R_{TL} , C_{TC} y C_{TL} que conforman las redes RC.

$$R_{TC} = \frac{U_2 - U_3}{I} \quad (5.10)$$

$$R_{TL} = \frac{U_3 - U_4}{I} \quad (5.11)$$

$$\tau_{TC} = R_{TC} * C_{TC} \quad (5.12)$$

$$\tau_{TL} = R_{TL} * C_{TL} \quad (5.13)$$

$$V_{Terminal} = V_{OC} - I(t) * R_S - I(t) * R_{TC} * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{TC}}}\right) - I(t) * R_{TL} * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{TL}}}\right) \quad (5.14)$$

5.4.5 Parametrización de la Celda Samsung SDI de 68Ah

Con la aplicación de los pulsos de corriente de carga a la celda, el voltaje varía de 3,1V en circuito abierto a 4,1V en voltaje terminal y 4,033 V en circuito abierto (Figura 5.32). Con la suma de las integrales de la corriente de carga en todos los intervalos que se aplican los pulsos de carga se logra introducir una capacidad total de 62,72Ah a la celda. En el proceso de parametrización, se tendrá en cuenta cómo afecta el SoC del acumulador a los elementos que conforman los circuitos equivalentes. El estado de carga del 100% del acumulador se considera cuando este llegue a los 68Ah, es decir a la capacidad dada por el fabricante. Se considera esta condición debido a que todas las celdas deben cumplir con un protocolo de cumplimiento de requerimientos mínimos los cuales deben ser similares antes de salir a la comercialización.

En la tabla 5.5 se presenta los valores de la capacidad que se ingresa en cada aplicación del pulso de carga al acumulador y su valor porcentual con respecto a la capacidad dada por el fabricante.

Tabla 5.5: Capacidad cargada a la celda Samsung SDI de 68Ah.

	Capacidad (Ah) por Pulso	SoC (%) Respecto a 68Ah	SOC (%) Acumulado
Pulso 1	5,997359296	8,819646024	8,819646024
Pulso 2	5,995519222	8,816940032	17,63658606
Pulso 3	5,995578541	8,817027266	26,45361332
Pulso 4	5,99320255	8,813533162	35,26714648
Pulso 5	5,987490954	8,805133755	44,07228024
Pulso 6	5,986462277	8,803620995	52,87590123
Pulso 7	5,984622108	8,800914864	61,6768161
Pulso 8	5,981393918	8,796167526	70,47298362
Pulso 9	5,814914409	8,55134472	79,02432834
Pulso 10	5,993529926	8,814014598	87,83834294
Pulso 11	2,998244631	4,409183281	92,24752622

Para obtener el valor de la resistencia interna del acumulador Samsung SDI de 68 Ah, se aplica la fórmula presentada en la ecuación 5.9. En la tabla 5.6 se presenta los resultados del cálculo de RS para el proceso de carga, entre el rango 8,81% y 92,24% del SoC que presenta el acumulador. En la Figura 5.37 se presenta el comportamiento de RS con respecto al SoC de la celda, dentro del intervalo de 0,00466 Ω y 0,00491 Ω , mientras en la ecuación 5.15 se presenta la dependencia RS con respecto al SoC .

Tabla 5.6: Resistencia interna calculada a la Samsung SDI de 68Ah.

RS				
SOC	U1	U2	I	RS
(pu)	(V)	(V)	(A)	(Ω)
0,08819646	3,547	3,489	12	0,004833333
0,17636586	3,613	3,5556	12	0,004783333
0,26453613	3,671	3,615	12	0,004666667
0,35267146	3,701	3,645	12	0,004666667
0,4407228	3,735	3,677	12	0,004833333
0,52875901	3,776	3,718	12	0,004833333
0,61676816	3,843	3,787	12	0,004666667
0,70472984	3,901	3,845	12	0,004666667
0,79024328	3,975	3,916	12	0,004916667
0,87838343	4,057	3,999	12	0,004833333
0,92247526	4,101	4,042	12	0,004916667

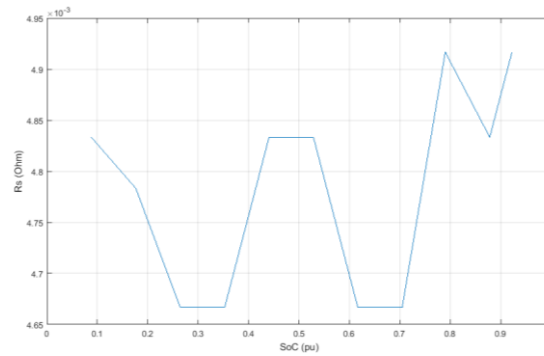


Figura 5.37: Resistencia Interna de la celda Samsung SDI de 68Ah.

$$RS = 0,00487028 - 0,000721211 * SoC + 0,000916292 * SoC^2 - 0,000109023 * SoC^3 \quad (5.15)$$

Para el cálculo de los componentes que conforman las redes RC; (RTC , CTC , RTL y CTL) para la representación de los “Transitorios Corto y Largo” que se da en el acumulador cuando se le aplica un pulso de corriente, se utilizan las ecuaciones de 5.10 a 5.13. En la tabla 5.7, se muestran los resultados de cálculo de RTC y CTC que conforman la red RC para el “Transitorio Corto”. Mientras que en la tabla 5.8 se presentan los resultados para el cálculo de RTL y CTL que conforman la red RC para el “Transitorio Largo”.

Tabla 5.7: Calculo de RTC y CTC para la celda Samsung SDI de 68Ah.

RTC y CTC							
SoC	U_2	U_3	$U\tau_{TC}$	I	RTC	τ_{TC}	CTC
(pu)	(V)	(V)	(V)	(A)	(Ω)	(s)	(F)
0,08819646	3,489	3,482	3,484576	12	0,000583333	36	61714,2857
0,17636586	3,5556	3,549	3,5514288	12	0,00055	35	63636,3636
0,26453613	3,615	3,611	3,612472	12	0,000333333	32	96000
0,35267146	3,645	3,641	3,642472	12	0,000333333	33	99000
0,4407228	3,677	3,669	3,671944	12	0,000666667	30	45000
0,52875901	3,718	3,71	3,712944	12	0,000666667	30	45000
0,61676816	3,787	3,781	3,783208	12	0,0005	30	60000
0,70472984	3,845	3,841	3,842472	12	0,000333333	30	90000
0,79024328	3,916	3,914	3,914736	12	0,000166667	30	180000
0,87838343	3,999	3,995	3,996472	12	0,000333333	30	90000
0,92247526	4,042	4,035	4,037576	12	0,000583333	30	51428,5714

Tabla 5.8: Calculo de RTL y CTL para la celda Samsung SDI de 68Ah.

RTL y CTL							
SOC (pu)	$U3$ (V)	$U4$ (V)	$U\tau_{TL}$ (V)	I (A)	RTL (Ω)	τ_{TL} (s)	CTL (F)
0,08819646	3,482	3,475	3,477576	12	0,000583333	294	504000
0,17636586	3,549	3,545	3,546472	12	0,000333333	219	657000
0,26453613	3,611	3,603	3,605944	12	0,000666667	260	390000
0,35267146	3,641	3,635	3,637208	12	0,0005	259	518000
0,4407228	3,669	3,667	3,667736	12	0,000166667	230	1380000
0,52875901	3,71	3,704	3,706208	12	0,0005	210	420000
0,61676816	3,781	3,774	3,776576	12	0,000583333	250	428571,429
0,70472984	3,841	3,838	3,839104	12	0,00025	260	1040000
0,79024328	3,914	3,913	3,913368	12	8,33333E-05	250	3000000
0,87838343	3,995	3,992	3,993104	12	0,00025	250	1000000
0,92247526	4,035	4,033	4,033736	12	0,000166667	260	1560000

En las Figura 5.38, se presenta la variación de la resistencia RTC y del capacitor CTC con respecto al SoC que presenta el acumulador, mientras que las ecuaciones 5.16 y 5.17 representan la dependencia entre RTC y el SoC , CTC y el SoC respectivamente.

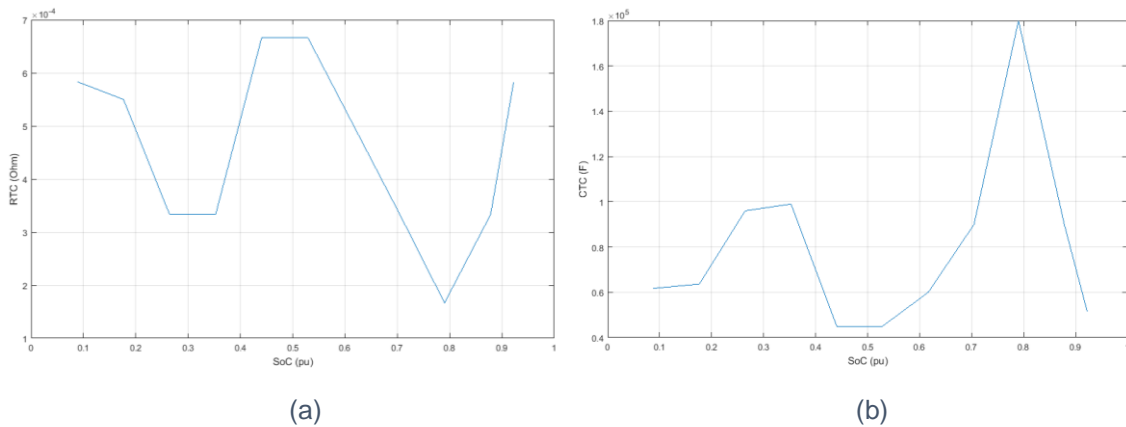


Figura 5.38: Parámetros de la red RC del Transitorio Corto de la celda Samsung SDI de 68Ah.
a) RTC vs SoC . b) CTC vs SoC .

$$RTC = 0,000472673 + 0,000587154 * SoC - 0,00181466 * SoC^2 + 0,00120251 * SoC^3 \quad (5.16)$$

$$CTC = 99259,5 - 319639 * SoC + 824032 * SoC^2 - 536329 * SoC^3 \quad (5.17)$$

La variación de la resistencia RTL y del capacitor CTL con respecto al SoC que presenta el acumulador se muestra en la Figura 3.39. Las ecuaciones 5.18 y 5.19 representan la dependencia entre RTL y el SoC , CTL y el SoC forma respectiva.

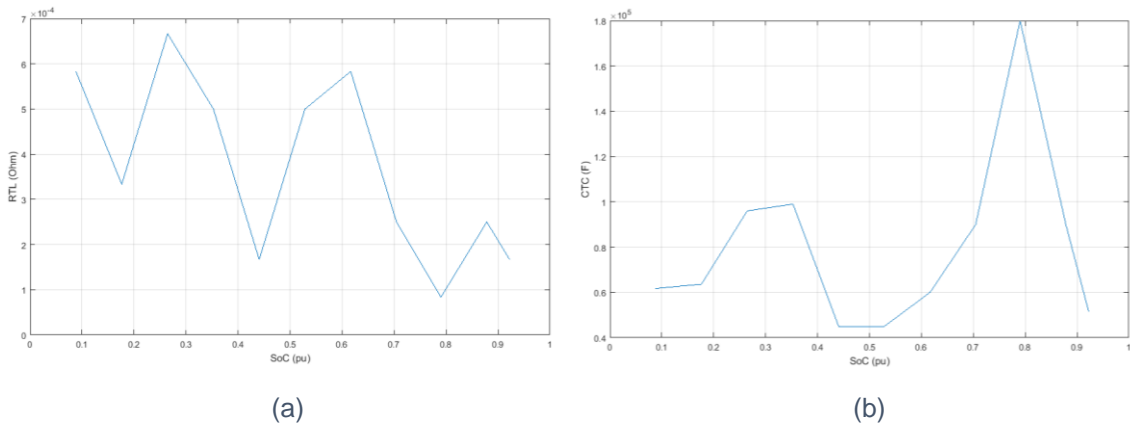


Figura 5.39: Parámetros de la red RC del Transitorio Largo de la celda Samsung SDI de 68Ah.
a) RTL vs SoC . b) CTL vs SoC .

$$RTL = 0,000540668 - 0,000172031 * SoC - 0,000031857 * SoC^2 - 0,00026396 * SoC^3 \quad (5.18)$$

$$CTL = 974131 - 4,82365E6 * SoC + 1,27208E7 * SoC^2 - 7,29908E6 * SoC^3 \quad (5.19)$$

La relación entre el voltaje de circuito abierto (VOC) y el estado de carga (SoC), se calcula de la curva de voltaje que presenta la celda como respuesta al proceso experimental de interrupción de corriente. Este voltaje de circuito abierto corresponde a la medida de voltaje en los bornes de la celda después del periodo de relajación ante las variaciones del SoC del acumulador que ya son conocidas. La tabla 5.9 presenta la relación entre el VOC y el SoC que presenta la celda, por interpolación se obtiene el valor del voltaje de circuito abierto en el estado de carga del 100% de la celda, debido a que en el experimento por seguridad no se sometió a la celda a un voltaje terminal mayor de 4,1V. La ecuación 5.20 describe la dependencia del VOC con respecto a todo el intervalo de variación del SoC que presenta la celda, mientras que la ecuación 5.21 representa la relación VOC respecto al SoC pero sin considerar el valor del voltaje de circuito abierto

en el estado de carga del 0%. En la Figura 5.40 se puede ver el comportamiento del voltaje de circuito abierto de la celda Samsung SDI de 68Ah.

Tabla 5.9: VOC vs SoC de la celda Samsung SDI de 68Ah.

VOC	
SoC (pu)	VOC (V)
0	3,105
0,08819646	3,475
0,17636586	3,545
0,26453613	3,603
0,35267146	3,635
0,4407228	3,667
0,52875901	3,704
0,61676816	3,774
0,70472984	3,838
0,79024328	3,913
0,87838343	3,992
0,92247526	4,033
1	4,09733

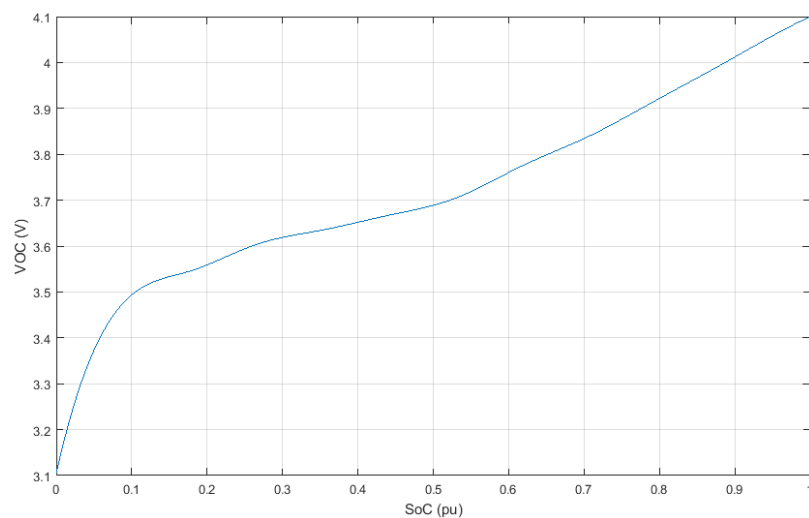


Figura 5.40: VOC vs SoC de la celda Samsung SDI de 68Ah.

$$VOC_{(0\%-100\%)SoC} = 3,10861 + 6,31254 * SoC - 33,7588 * SoC^2 + 92,7294 * SoC^3 - 132,439 * SoC^4 + 95,6492 * SoC^5 - 27,5034 * SoC^6 \quad (5.20)$$

$$VOC_{(8,8\%-100\%)SoC} = 3,3980 + 0,7177 * SoC + 3,1291 * SoC^2 - 19,7287 * SoC^3 + 40,864 * SoC^4 - 35,4424 * SoC^5 + 11,1623 * SoC^6 \quad (5.21)$$

Para determinar el capacitor serie del modelo planteado en [24], para la celda Samsung SDI de 68Ah se realiza el cálculo presentado en la tabla 5.10, en la ecuación 4.29 se presenta la ecuación del parámetro α , al igual que en [24] el capacitor (que representa la dependencia de la capacidad del acumulador con respecto a la corriente y el tiempo) se obtiene a partir del parámetro auxiliar α . La Figura 5.41 muestra el comportamiento del parámetro auxiliar α . La ecuación 5.22 muestra la dependencia de α con respecto al SoC .

Tabla 5.10: Cálculo de α para la celda Samsung SDI de 68Ah.

α					
SoC (pu)	$U4$ (V)	$U4'$ (V)	I (A)	Q (A * s)	α (V/s)
0,264536133	3,603	3,545	12	21600	2,68519E-06
0,352671465	3,635	3,603	12	21600	1,48148E-06
0,440722802	3,667	3,635	12	21600	1,48148E-06
0,528759012	3,704	3,667	12	21600	1,71296E-06
0,616768161	3,774	3,704	12	21600	3,24074E-06
0,704729836	3,838	3,774	12	21600	2,96296E-06
0,790243283	3,913	3,838	12	21600	3,47222E-06

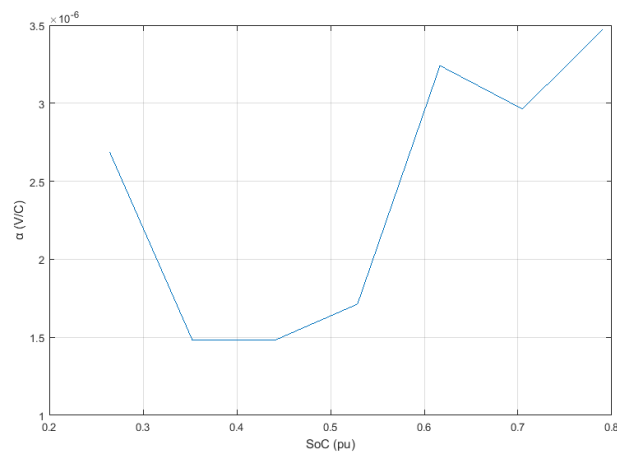


Figura 5.41: Comportamiento de α para la celda Samsung SDI de 68Ah.

$$\alpha = 0,0000166183 - 0,0000918983 * SoC + 0,000174685 * SoC^2 - 0,000100753 * SoC^3 \quad (5.22)$$

5.4.5.1 Validación del modelo para la celda Samsung de 68Ah

Para verificar la exactitud de los resultados de los parámetros extraídos, estos se aplicaron en los modelos implementados en el software Simulink, con el fin de simular las mismas corrientes de carga dadas al acumulador en el proceso experimental para la extracción de parámetros. Implementando la ecuación 5.20 que representa la relación del VOC y el SoC (en todo el intervalo de variación del SoC), se obtiene una buena coincidencia entre los resultados de los modelos simulados y los datos del procedimiento experimental en el rango del SoC mayores al 8,8% (Figura 5.42). En la tabla 5.11 se muestran los errores máximos que presentan (en las zonas denominadas “zona 1”) cada uno de los modelos en la magnitud del voltaje y el tiempo de ejecución con respecto a los datos experimentales.

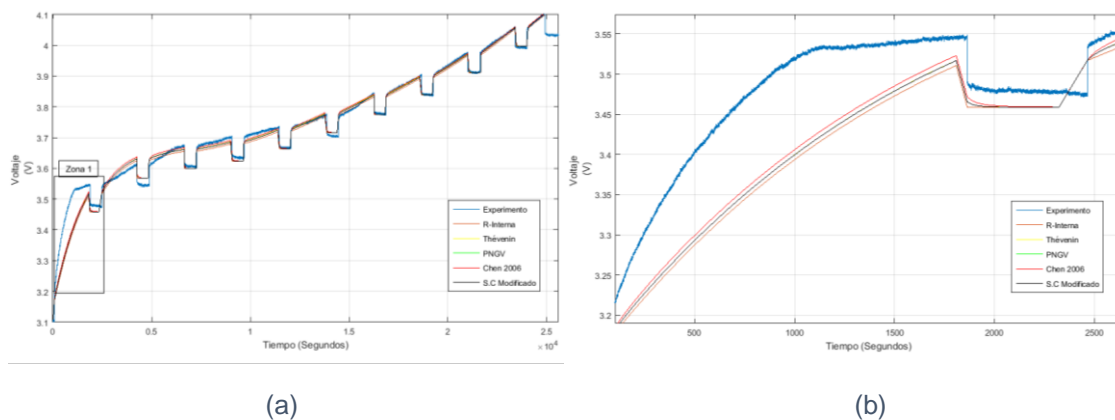


Figura 5.42: Primera validación de la celda Samsung SDI de 68Ah.
a) Modelo ajustado con la ecuación de VOC 5.20. b) Error máximo para un SoC bajo.

Tabla 5.11: Error primera validación con modelos ajustado con la ecuación de VOC 5.20.

MODELOS	Máximo Error		Tiempo de ejecución (%)
	(mV)	(%)	
R-Interna	118	3,3560865	2,898550725
Thévenin	116	3,2992036	2,898550725
PNGV	116	3,2992036	2,898550725
Chen 2006	106	3,0147895	2,898550725
S.C Modificado	116	3,2992036	2,898550725

En los resultados de los errores máximos, el modelo que presenta el valor de mayor magnitud es el de “Resistencia Interna”, mientras que los modelos de Thévenin, PNGV y S.C Modificado presentan los mismos resultados con un valor intermedio entre el modelo de menor exactitud y el modelo que mejor se acerca al valor experimental que resulta ser el modelo Chen 2006.

Por otra parte aplicando la ecuación 5.21 que representa la relación del VOC y el SoC , (en el intervalo de variación del SoC conformado entre el 8,8% y el 100%) en los modelos se obtiene los resultados que se presentan en la Figura 5.43 y con los errores máximos dados en la tabla 5.12 .

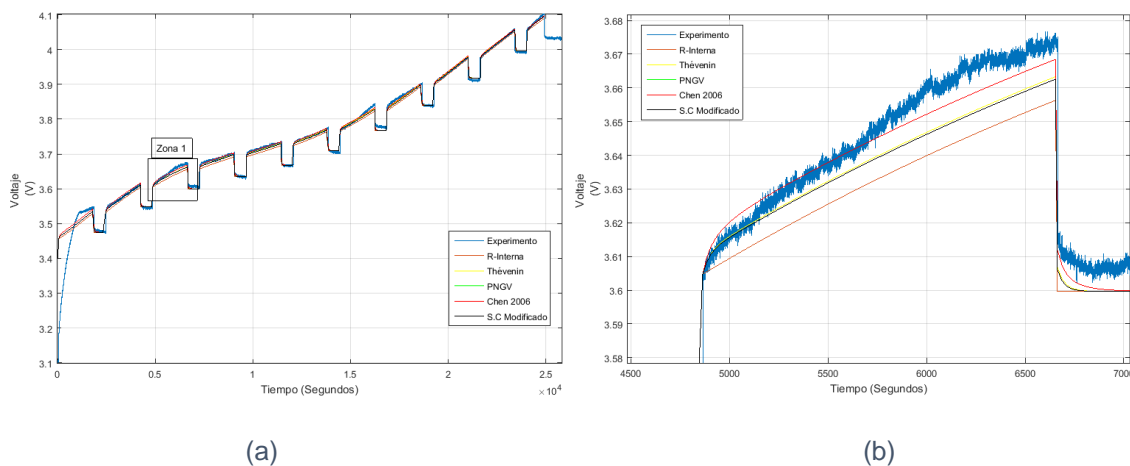


Figura 5.43: Segunda validación de la celda Samsung SDI de 68Ah.

a) Modelo ajustado con la ecuación de VOC 5.21. b) Error máximo para un SoC medio.

Tabla 5.12: Error segunda validación con modelos ajustados con la ecuación de VOC 5.21.

MODELOS	Máximo Error		Tiempo de ejecución (%)
	(mV)	(%)	
R-Interna	31	0,8430786	0,150060024
Thévenin	21	0,5711178	0,150060024
PNGV	24	0,652706	0,165066026
Chen 2006	19	0,5167256	0,150060024
S.C Modificado	24	0,652706	0,150060024

La celda se sometió a diferentes perfiles de corriente, con el fin de comprobar el funcionamiento de los modelos cuando las celdas están con un estado de carga inicial (SoC_0) de 65% y los modelos ajustados con la ecuación 5.21 que corresponde al voltaje

de circuito abierto. En la Figura 5.44, se puede ver los resultados de los modelos simulados y los obtenidos en los terminales de las celdas, cuando se aplica un perfil de corriente de dos pulsos de carga y un pulso de descarga que tiene la misma amplitud de 10A e igual periodo. Mientras que en la Figura 5.45 se puede ver los resultados de la celda y de la simulación cuando se aplica tres pulsos de descarga y dos de carga con igual amplitud pero con diferente periodo. Al comparar los resultados experimentales con los que arrojan las simulaciones de los modelos, se evidencia que el mejor se ajusta es el modelo de Chen 2006. En las tablas 5.13 y 5.14 se puede ver los errores máximos entre las simulaciones y el resultado experimental.

En un perfil de descarga por impulsos aplicado a la celda con una corriente aproximada de 12A, se dan los resultados de errores máximos presentados en las tablas 5.15 y 5.16 al ajustar los modelos con las ecuaciones de circuito abierto 5.20 y 5.21 respectivamente. Los resultados para estas dos consideraciones se muestran en las Figuras 5.46 y 5.47 en forma respectiva.

Nota: Para los procesos de descarga se hace uso de reóstatos no variables (carga no programable), de modo que los impulsos de corriente no son constantes ya que el voltaje de la celda depende del estado de carga.

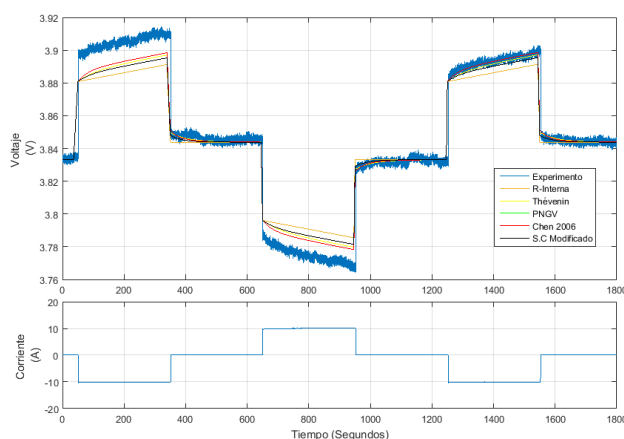


Figura 5.44: Tercera validación de la celda Samsung SDI de 68Ah.

Tabla 5.13: Error tercera validación de la celda Samsung SDI de 68Ah.

MODELOS	Máximo Error		Tiempo de ejecución (%)
	(mV)	(%)	
R-Interna	18	0,4770739	2,635782748
Thévenin	12	0,3180493	2,635782748
PNGV	14	0,3710575	2,635782748
Chen 2006	11	0,2915452	2,635782748
S.C Modificado	14	0,3710575	2,635782748

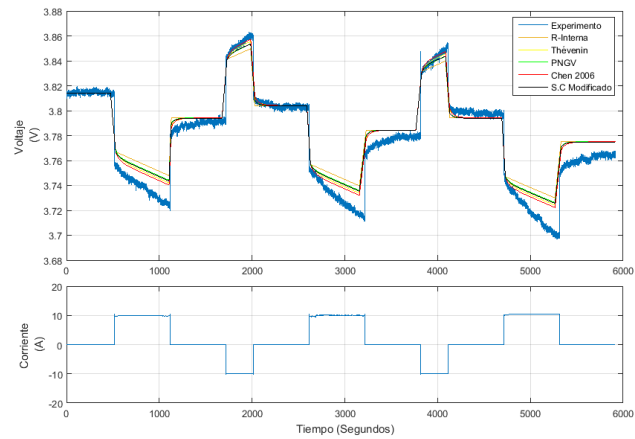


Figura 5.45: Cuarta validación de la celda Samsung SDI de 68Ah.

Tabla 5.14: Error cuarta validación de la celda Samsung SDI de 68Ah.

MODELOS	Máximo Error		Tiempo de ejecución (%)
	(mV)	(%)	
R-Interna	27	0,7291385	0,977811207
Thévenin	22	0,5941129	0,977811207
PNGV	23	0,621118	0,977811207
Chen 2006	19	0,5130975	0,977811207
S.C Modificado	23	0,621118	0,977811207

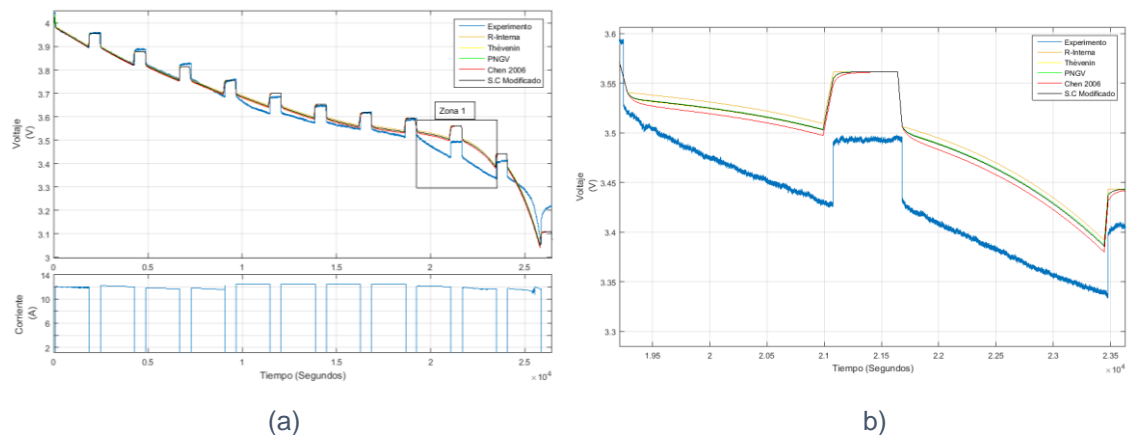


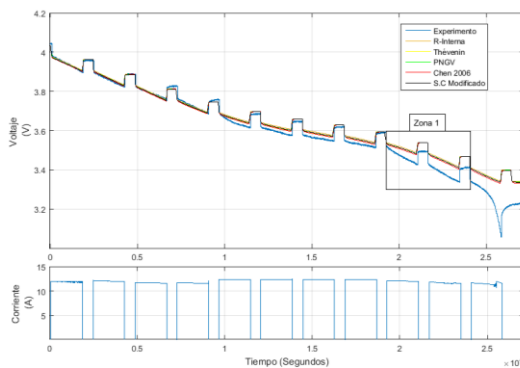
Figura 5.46: Quinta validación de la celda Samsung SDI de 68Ah.

a) Modelo ajustado con la ecuación de VOC 5.20.

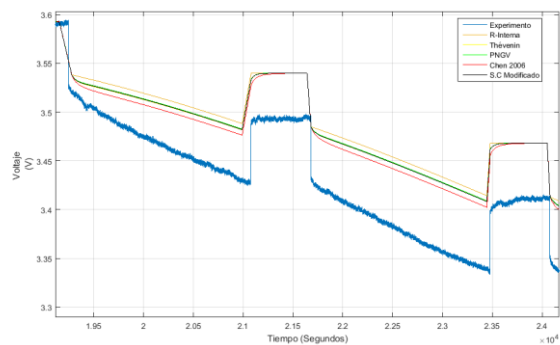
b) Error máximo para un SoC medio-bajo.

Tabla 5.15: Error quinta validación con modelos ajustados con la ecuación de VOC 5.21.

MODELOS	Máximo Error		Tiempo de ejecución (%)
	(mV)	(%)	
R-Interna	81	2,3628938	0,379686758
Thévenin	75	2,1878646	0,379686758
PNGV	76	2,2170362	0,379686758
Chen 2006	69	2,0128355	0,379686758
S.C Modificado	75	2,1878646	0,379686758



(a)



(b)

Figura 5.47: Sexta validación de la celda Samsung SDI de 68Ah.

a) Modelo ajustado con la ecuación de VOC 5.21.

b) Error máximo para un SoC medio-bajo.

Tabla 5.16: Error sexta validación con modelos ajustados con la ecuación de VOC 5.21.

MODELOS	Máximo Error		Tiempo de ejecución (%)
	(mV)	(%)	
R-Interna	97	2,9050614	0,237642586
Thévenin	91	2,7253669	0,237642586
PNGV	92	2,755316	0,237642586
Chen 2006	85	2,5456724	0,237642586
S.C Modificado	91	2,7253669	0,237642586

5.4.6 Parametrización de la Celda A123 modelo AMP20M1HD-A

Con la aplicación de los pulsos de corriente de carga a la celda, el voltaje varia de 2,59V en circuito abierto a 3,95V en voltaje terminal y 3,80V en circuito abierto (Figura 5.33). Con la suma de las integrales de la corriente de carga en todos los intervalo que se aplican los pulsos de carga se logra introducir una capacidad total de 19,70Ah a la celda. En la tabla 5.17 se presenta los valores de la capacidad y su valor porcentual con respecto a la capacidad nominal que se ingresa al acumulador con cada aplicación del pulso de carga.

Tabla 5.17: Capacidad cargada a la celda A123 (AMP20M1HD-A).

	Capacidad (Ah) por Pulso	SoC (%) Respecto a 20Ah	SOC (%) Acumulado
Pulso 1	1,99512053	9,97560266	9,97560266
Pulso 2	1,98573542	9,92867709	19,9042797
Pulso 3	1,98022682	9,901134122	29,8054139
Pulso 4	1,97434298	9,871714907	39,6771288
Pulso 5	1,96721409	9,83607043	49,5131992
Pulso 6	1,96331142	9,816557115	59,3297563
Pulso 7	1,95818287	9,790914343	69,1206707
Pulso 8	1,95888075	9,794403758	78,9150744
Pulso 9	1,96161281	9,808064071	88,7231385
Pulso 10	1,96325162	9,816258099	98,5393966

Con un proceso similar al seguido en el apartado 5.4.5 para la parametrización del circuito equivalente de la celda Samsung SDI de 68Ah, se procede a obtener los parámetros para los modelos de la celda A123 modelo AMP20M1HD-A. En la tabla 5.18 se presenta el cálculo de la resistencia serie (R_S) para el proceso de carga (entre el rango 9,972% y 98,53% del SoC del acumulador). Mientras en que la Figura 5.48 se presenta el comportamiento de R_S con respectos al SoC de la celda, dentro del intervalo de 0,036 Ω y 0,0395 Ω . La ecuación 5.23 presenta la dependencia de R_S con respecto al SoC.

Tabla 5.18: Cálculo de RS de la celda A123 (AMP20M1HD-A).

RS				
SoC	$U1$	$U2$	I	RS
(pu)	(V)	(V)	(A)	(Ω)
0,09975603	3,588	3,432	4	0,039
0,1990428	3,665	3,516	4	0,03725
0,29805414	3,702	3,556	4	0,0365
0,39677129	3,75	3,604	4	0,0365
0,49513199	3,778	3,631	4	0,03675
0,59329756	3,795	3,649	4	0,0365
0,69120671	3,818	3,669	4	0,03725
0,78915074	3,85	3,701	4	0,03725
0,88723138	3,893	3,745	4	0,037
0,98539397	3,958	3,81	4	0,037

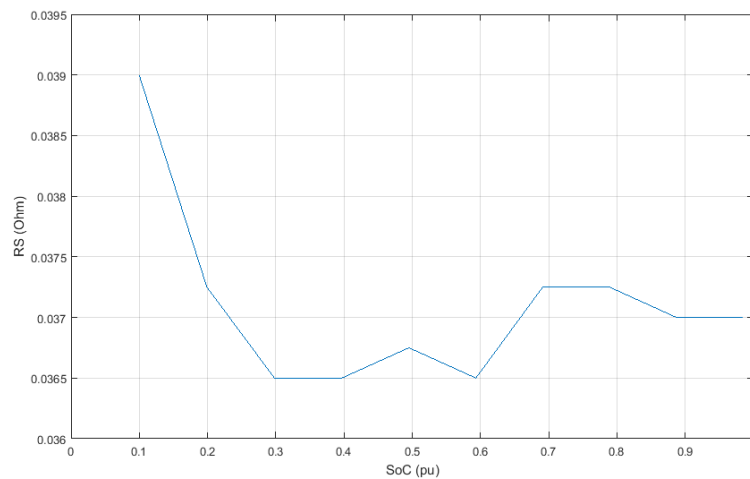


Figura 5.48: Resistencia Interna de la celda A123 (AMP20M1HD-A).

$$RS = 0,0410978 - 0,0270314 * SoC + 0,0484897 * SoC^2 - 0,0258109 * SoC^3 \quad (5.23)$$

La tabla 5.19, muestra los resultados de los cálculos de RTC y CTC . Mientras que en la tabla 5.20 se presentan los resultados para el cálculo de RTL y CTL .

Tabla 5.19: Calculo de RTC y CTC para la A123 (AMP20M1HD-A).

RTC y CTC							
SOC (pu)	U_2 (V)	U_3 (V)	$U\tau_{TC}$ (V)	I (A)	RTC (Ω)	τ_{TC} (s)	CTC (F)
0,09975603	3,432	3,419	3,427203	4	0,00325	19	5846,15385
0,1990428	3,516	3,506	3,51231	4	0,0025	20	8000
0,29805414	3,556	3,545	3,551941	4	0,00275	15	5454,54545
0,39677129	3,604	3,597	3,601417	4	0,00175	19	10857,1429
0,49513199	3,631	3,623	3,628048	4	0,002	20	10000
0,59329756	3,649	3,641	3,646048	4	0,002	20	10000
0,69120671	3,669	3,661	3,666048	4	0,002	20	10000
0,78915074	3,701	3,69	3,696941	4	0,00275	20	7272,72727
0,88723138	3,745	3,732	3,740203	4	0,00325	20	6153,84615
0,98539397	3,81	3,804	3,807786	4	0,0015	20	13333,3333

Tabla 5.20: Calculo de RTL y CTL para la A123 (AMP20M1HD-A).

RTL y CTL							
SOC (pu)	U_3 (V)	U_4 (V)	$U\tau_{TL}$ (V)	I (A)	RTL (Ω)	τ_{TL} (seg)	CTL (F)
0,09975603	3,419	3,407	3,414584	4	0,003	182	60666,6667
0,1990428	3,506	3,497	3,502688	4	0,00225	183	81333,3333
0,29805414	3,545	3,539	3,542792	4	0,0015	191	127333,333
0,39677129	3,597	3,591	3,594792	4	0,0015	104	69333,3333
0,49513199	3,623	3,619	3,621528	4	0,001	200	200000
0,59329756	3,641	3,64	3,640632	4	0,00025	190	760000
0,69120671	3,661	3,658	3,659896	4	0,00075	200	266666,667
0,78915074	3,69	3,687	3,688896	4	0,00075	190	253333,333
0,88723138	3,732	3,726	3,729792	4	0,0015	180	120000
0,98539397	3,804	3,802	3,803264	4	0,0005	200	400000

En la Figura 5.49, se presenta variación de la resistencia RTC y del capacitor CTC con respecto al SoC que presenta el acumulador A123 modelo AMP20M1HD-A, mientras

que las ecuaciones 5.24 y 5.25 representan la dependencia entre RTC y el SoC , CTC y el SoC respectivamente.

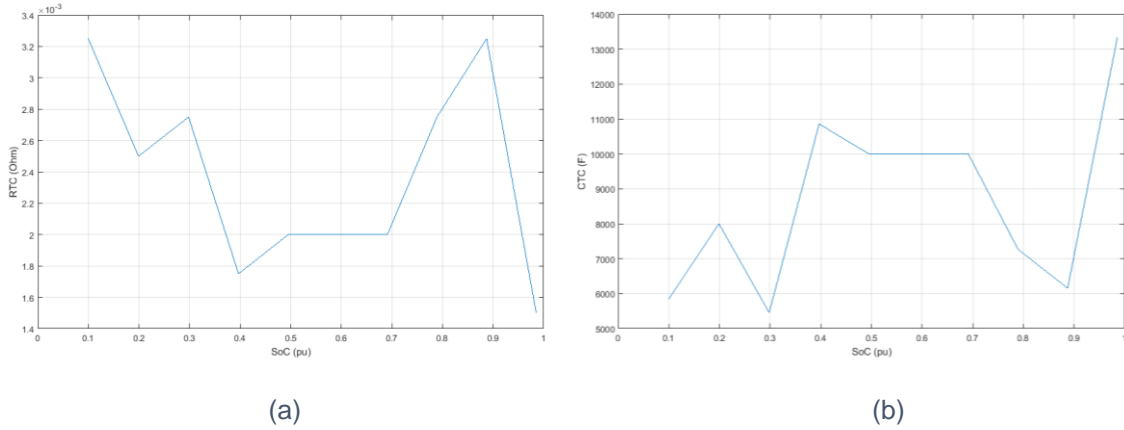


Figura 5.49: Parámetros de la red RC del Transitorio Corto de la celda A123 (AMP20M1HD-A).
a) RTC vs SoC . b) CTC vs SoC .

$$RTC = 0,00485046 - 0,0174597 * SoC + 0,0330768 * SoC^2 - 0,0185732 * SoC^3 \quad (5.24)$$

$$CTC = 572,322 + 54271,8 * SoC - 104445 * SoC^2 + 61299,2 * SoC^3 \quad (5.25)$$

La variación de la resistencia RTL y del capacitor CTL con respecto al SoC que se presenta en la celda A123 modelo AMP20M1HD-A se muestra en la Figura 5.50. Las ecuaciones 5.26 y 5.27 representan la dependencia entre RTL y el SoC , CTL y el SoC en forma respectiva.

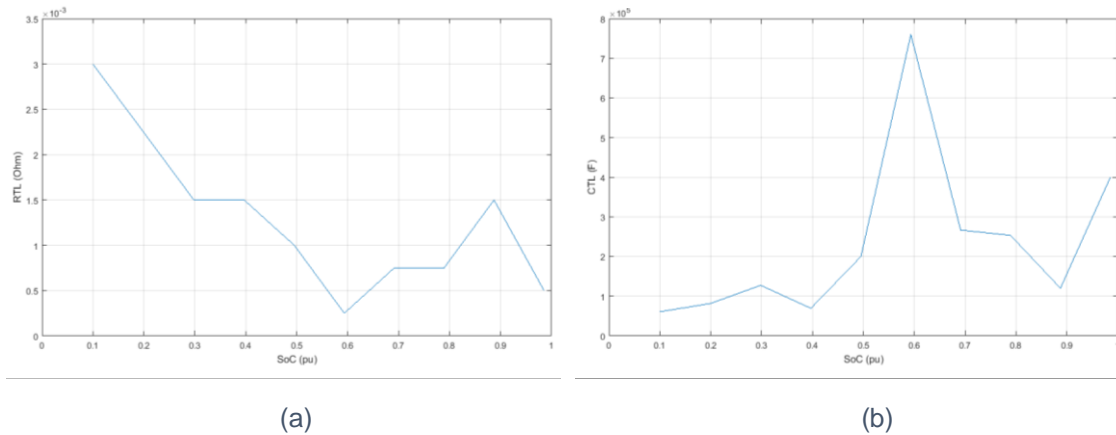


Figura 5.50: Parámetros de la red RC del Transitorio Largo de la celda A123 (AMP20M1HD-A).
a) RTL vs SoC . b) CTL vs SoC .

$$RTL = 0,00426731 - 0,0135998 * SoC + 0,017359 * SoC^2 - 0,0071888 * SoC^3 \quad (5.26)$$

$$CSL = -46618,7 + 621555 * SoC + 435155 * SoC^2 - 759353 * SoC^3 \quad (5.27)$$

La relación entre el voltaje de circuito abierto (VOC) y el estado de carga (SoC) de la celda A123 (AMP20M1HD-A) se presentan en la tabla 5.21; las ecuaciones 5.28 y 5.29 describen el comportamiento de la relación del VOC y el SoC , en el rango de todo el SoC considerado y despreciando el punto de descarga completa respectivamente. La Figura 5.51 muestra el comportamiento del VOC de la celda A123 (AMP20M1HD-A).

Tabla 5.21: VOC vs SoC de la celda A123 (AMP20M1HD-A).

VOC	
SoC	VOC
(pu)	(V)
0	2,600
0,09975603	3,407
0,1990428	3,497
0,29805414	3,539
0,39677129	3,591
0,49513199	3,619
0,59329756	3,64
0,69120671	3,658
0,78915074	3,687
0,88723138	3,726
0,98539397	3,802

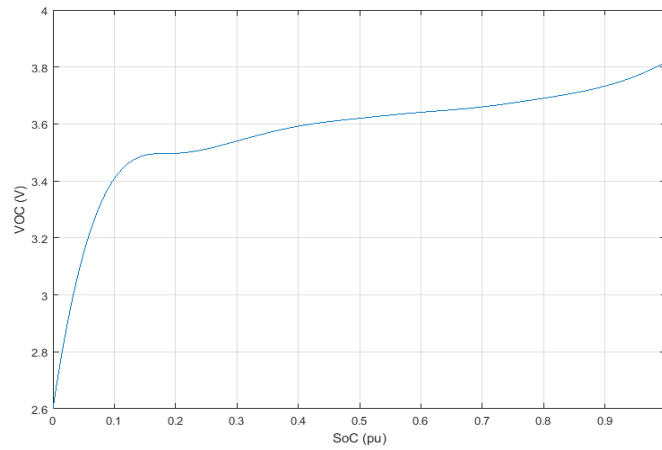


Figura 5.51: VOC vs SoC de la celda A123 (AMP20M1HD-A).

$$VOC_{(0\%-98,53\%)SoC} = 2,6003 + 16,6186 * SoC - 125,471 * SoC^2 + 492,796 * SoC^3 - 1068,22 * SoC^4 + 1291,24 * SoC^5 - 815,393 * SoC^6 + 209,664 * SoC^7 \quad (5.28)$$

$$VOC_{(9,97\%-98,53\%)SoC} = 3,28756 + 1,38835 * SoC - 2,05542 * SoC^2 + 1,18968 * SoC^3 \quad (5.29)$$

En la tabla 5.22 se presenta el cálculo del parámetro auxiliar α para el cálculo del capacitor serie del modelo S.C Modificado, mientras que la ecuación 5.30 y la Figura 5.52 representan la dependencia y la variación respectivamente de α con respecto al SoC .

Tabla 5.22: Cálculo de α para la celda A123 (AMP20M1HD-A).

α					
SoC (pu)	$U4$ (V)	$U4'$ (V)	I (A)	Q (A * s)	α (V/s)
0,298054139	3,539	3,497	4	7200	5,83333E-06
0,396771288	3,591	3,539	4	7200	7,22222E-06
0,495131992	3,619	3,591	4	7200	3,88889E-06
0,593297563	3,64	3,619	4	7200	2,91667E-06
0,691206707	3,658	3,64	4	7200	2,5E-06
0,789150744	3,687	3,658	4	7200	4,02778E-06

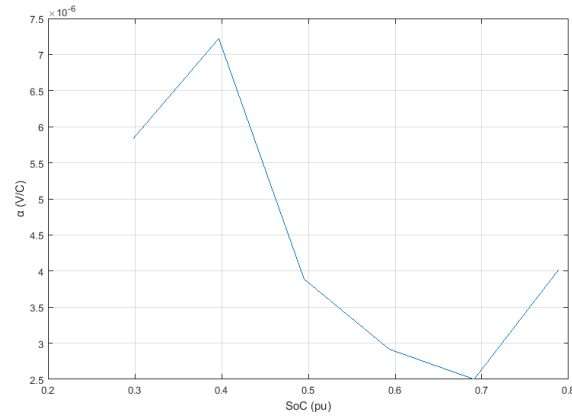
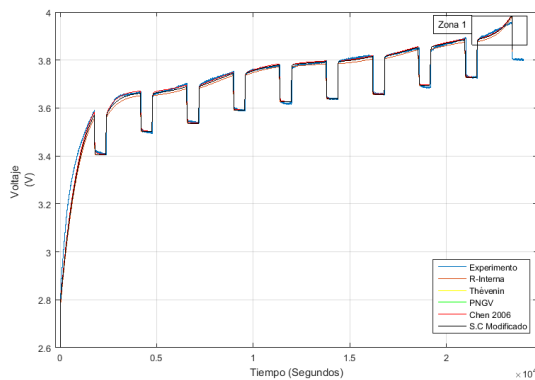


Figura 5.52: Comportamiento de α para la celda A123 (AMP20M1HD-A).

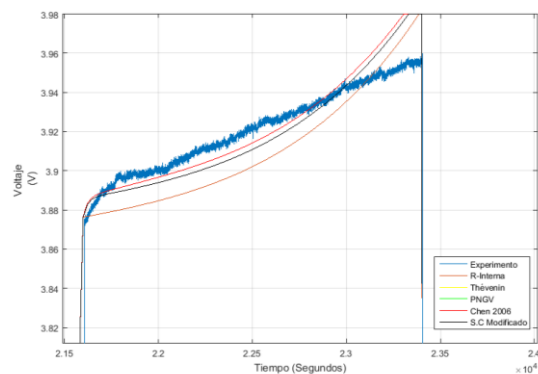
$$\alpha = -0,0000224438 + 0,000197728 * SoC - 0,00042392 * SoC^2 + 0,000273863 * SoC^3 \quad (5.30)$$

5.4.6.1 Validación del modelo para la celda A123 modelo AMP20M1HD-A

En la Figura 5.53 se muestran los resultados de las simulaciones comparados con los resultados experimentales. En la tabla 5.23 se presentan los máximos errores de las simulaciones con respecto a los datos reales, cuando se introduce la ecuación 5.28, que describe el voltaje de circuito abierto de entre el 0% al 100% del SoC en los modelos implementados en Simulink.



(a)



(b)

Figura 5.53: Primera validación de la celda A123 (AMP20M1HD-A).

a) Modelo ajustado con la ecuación de VOC 5.28.

b) Error máximo para un SoC alto.

Tabla 5.23: Error primera validación con modelos ajustados con la ecuación de VOC 5.28.

MODELOS	Máximo Error		Tiempo de ejecución (%)
	(mV)	(%)	
R-Interna	20	0,5111168	0,376344086
Thévenin	11	0,2811142	0,376344086
PNGV	11	0,2811142	0,376344086
Chen 2006	7	0,1788909	0,376344086
S.C Modificado	11	0,2811142	0,376344086

La Figura 4.54 presenta los resultados de las simulaciones con respecto al experimento para la extracción de datos, cuando los modelos están configurados con la ecuación de *VOC* en el intervalo de 9,9% al 98% (ecuación 5.29). De igual forma la tabla 5.24 se muestra los errores máximos. Por otra parte, en la Figura 5.55 se muestra cuando la celda es sometida a una carga continua con sus respectivos errores máximo indicados en la tabla 5.25.

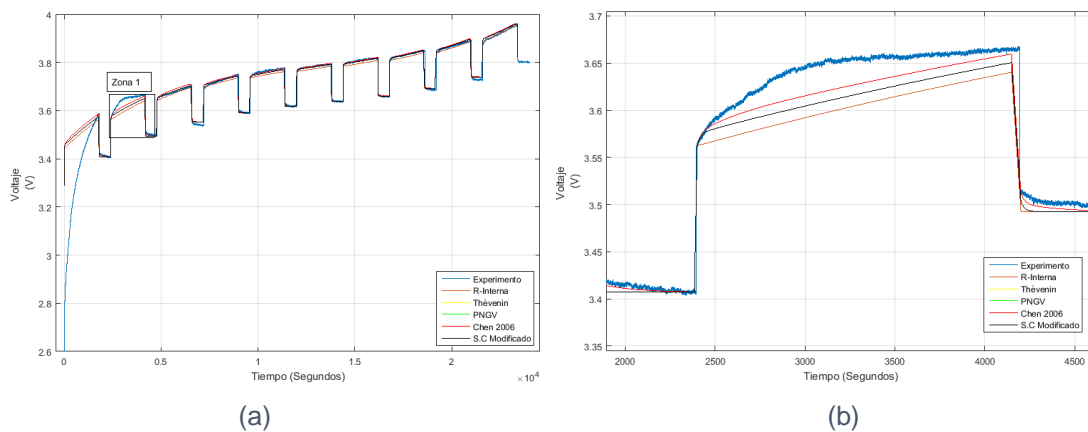


Figura 5.54: Segunda validación de la celda A123 (AMP20M1HD-A).

a) Modelo ajustado con la ecuación de VOC 5.29.

b) Error máximo para un *SoC* bajo.

Tabla 5.24: Error segunda validación con modelos ajustados con la ecuación de VOC 5.29.

MODELOS	Máximo Error		Tiempo de ejecución (%)
	(mV)	(%)	
R-Interna	54	1,4794521	1,208585122
Thévenin	42	1,1506849	1,208585122
PNGV	42	1,1506849	1,208585122
Chen 2006	31	0,8493151	1,208585122
S.C Modificado	42	1,1506849	1,208585122

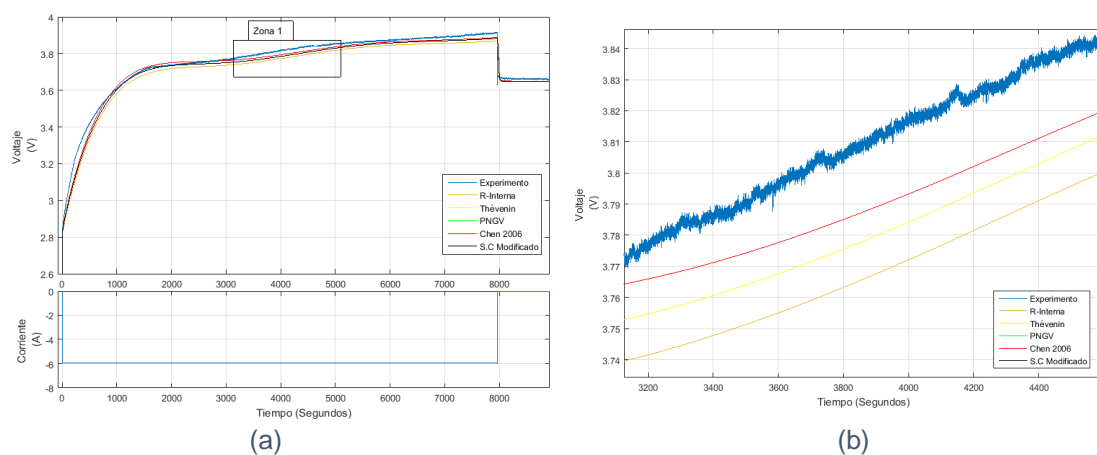


Figura 5.55: Tercera validación de la celda A123 (AMP20M1HD-A).

a) Tercera validación celda A123 (AMP20M1HD-A).

b) Error máximo para un SoC medio.

Tabla 5.25: Error tercera validación celda A123 (AMP20M1HD-A).

MODELO	Máximo Error		Tiempo de ejecución (%)
	(mV)	(%)	
R-Interna	41	1,0721757	0,414104656
Thévenin	29	0,7583682	0,414104656
PNGV	29	0,7583682	0,414104656
Chen 2006	21	0,5491632	0,414104656
S.C Modificado	29	0,7583682	0,414104656

5.5 Comparación de los modelos de Circuitos Equivalentes

Como se puede ver en los resultados que se presentan en las tablas de “Máximo Error”, en todos los procesos de validación de las dos celdas modeladas, el orden de coincidencia entre los resultados de los modelos y los resultados experimentales son: el modelo de Chen 2006 con los mejores resultados, luego Thévenin, el modelo PNGV y S.C Modificado con los resultados muy próximos entre sí, pero el que menos se acerca a los datos reales es el modelo de Resistencia Interna.

De los cinco modelos de circuitos equivalentes que se parametrizaron, se puede evidenciar que el modelo que mejor reproduce las respuestas transitorias y el que mejor se ajusta a los datos experimentales del acumulador, es el modelo que está conformado por dos redes RC, es decir el modelo propuesto por Chen 2006. En la Figura 5.56 se ilustra tal afirmación, asimismo, en ella se puede ver que el comportamiento del modelo PNGV y el modelo modificado de Sandra Castaño, tiene un comportamiento idéntico en todo el intervalo de la simulación.

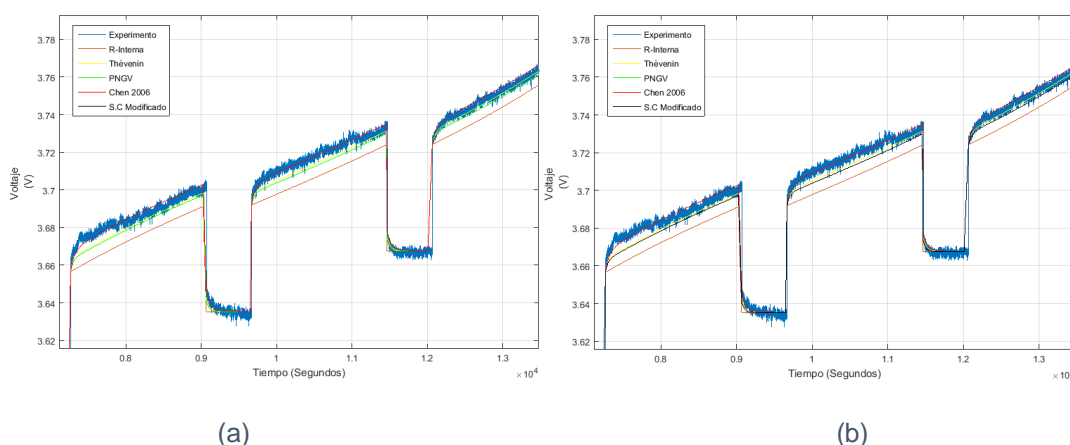


Figura 5.56: Comparación de la exactitud de los modelos.
a) Visible PNGV. b) Visible S.C Modificado.

5.6 Caracterización de las celdas como Bancos Acumuladores del VE Kia Soul

Con el fin de caracterizar las celdas modeladas (A123 de 20Ah y Samsung SDI de 68Ah) como un banco acumulador aplicado al vehículo Kia Soul y ver su rendimiento energético, se procede a la configurar los modelos con las entradas necesarias (calculadas a en la tabla 5.26) para cada uno de ellos.

Los datos de mayor relevancia del banco acumulador del VE Kia Soul son:

- Voltaje nominal del banco 355,2 V.
- Capacidad nominal del banco 75 Ah.
- Capacidad de energía 26,640 kWh.
- La energía específica 160 Wh/kg.
- La densidad de energía 150 Wh/L.

Las caracterizaciones para el banco, se los realiza con los valores utilizables (nominales).

Tabla 5.26: Datos característicos de los modelos.

Voltaje Nominal			
Marca	Voltaje nominal por celda (V)	Voltaje nominal por banco (V)	
SK Innovación	3,7	3,7V*96=355,2	
Samsung SDI de 68Ah	3,7	3,7V*96=355,2	
A123 (AMP20M1HD-A)	3,3	3,3V*108=356,4	
Capacidad Nominal			
Marca	Capacidad nominal por celda (Ah)	Capacidad nominal por banco (Ah)	
SK Innovación	37,5	2 * 37,5 = 75	
Samsung SDI de 68Ah	68	68 * 1 = 68	
A123 (AMP20M1HD-A)	20	20Ah * 4 = 80	
Energía Nominal			
	Capacidad nominal por banco (Ah)	Voltaje nominal por banco (V)	Capacidad de energía kWh
SK Innovación	75	355,2	26,640
Samsung SDI de 68Ah	68	355,2	24,15
A123 (AMP20M1HD-A)	80	356,4	28,51
Masa del Banco			
	Potencia específica por Wh/Kg	Capacidad de energía kWh	Masa del Banco Kg
SK Innovación	160	26,640	166,5
Samsung SDI de 68Ah	123	24,15	196,341
A123 (AMP20M1HD-A)	131	28,51	217,634
Volumen del Banco			
	Densidad de energía Wh/L	Capacidad de energía kWh	Volumen del Banco L
SK Innovación	150	26,640	177,6
Samsung SDI de 68Ah	259	24,15	93,2432
A123 (AMP20M1HD-A)	247	28,51	115,425

El comportamiento de los nuevos bancos que se armaron con las celdas modeladas (modelos de Chen 2006), se compara con el modelo del banco del VE Kia Soul que se realizó en la sección 5.3 y en el que se tiene un error máximo del 2,85%. Las pruebas que son aplicadas a los modelos de los bancos (Figura 5.57), corresponden a los

consumos de potencia para las diferentes velocidades del vehículo indicados en la tabla 5.27 (resultados de las pruebas del INL [36]).

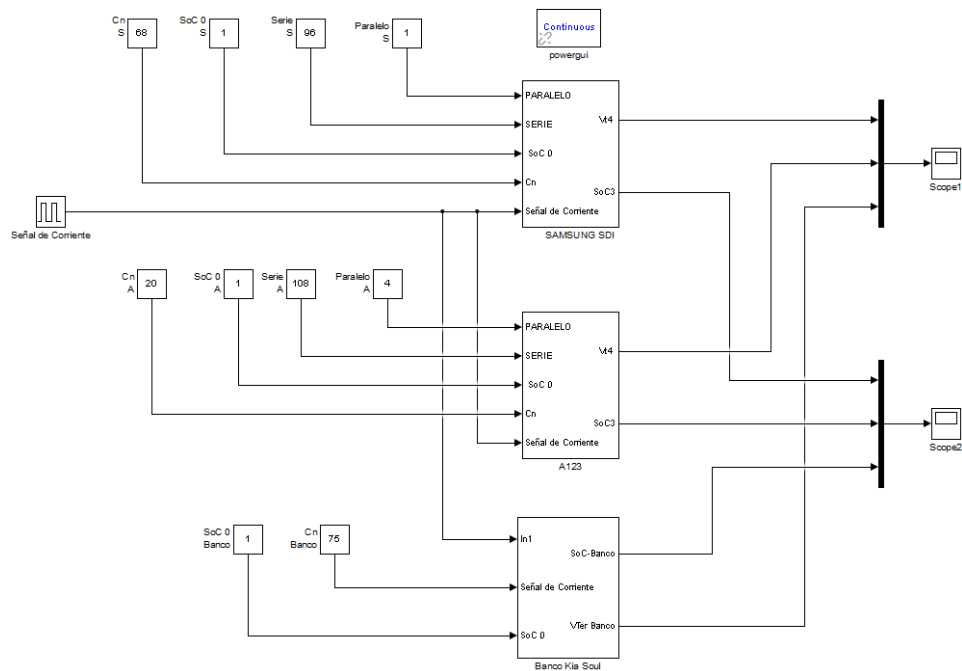


Figura 5.57: Bloque de los Bancos Acumuladores.

Tabla 5.27: Potencia vs Velocidad.

Prueba	Velocidad (km/h)	Potencia promedio (KW)	Corriente Promedio (A)
1	16	1,269	3,57
2	32	2,750	7,7
3	64	8,052	22,7
4	80	12,165	34,2
5	120	26,648	75
6	128	33,712	94,9

En la Figura 5.58, se muestran los resultados de las simulaciones de los bancos acumuladores para las diferentes corrientes de descarga constante que corresponden a las velocidades promedio del vehículo, se puede observar también que el voltaje terminal, el estado de carga (*SoC*) y el tiempo que tarda para alcanzar la descarga completa de cada uno de los bancos.

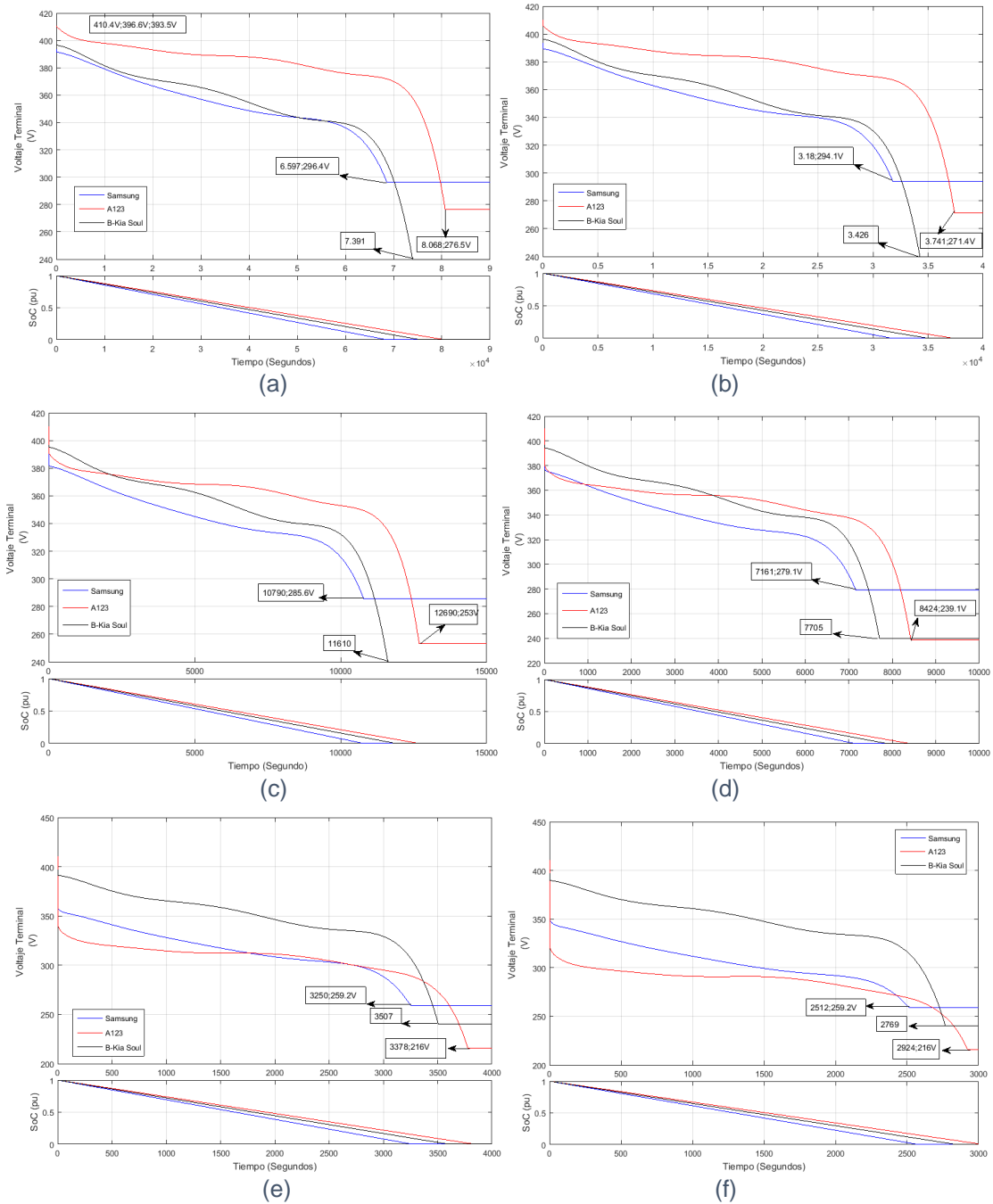


Figura 5.58: Resultados de Pruebas de Descarga en los Bancos Acumuladores Planteados.

- a) Comportamiento del acumulador para una velocidad constante de 16Km/h.
- b) Comportamiento del acumulador para una velocidad constante de 32Km/h.
- c) Comportamiento del acumulador para una velocidad constante de 64Km/h.
- d) Comportamiento del acumulador para una velocidad constante de 80Km/h.
- e) Comportamiento del acumulador para una velocidad constante de 120Km/h.
- f) Comportamiento del acumulador para una velocidad constante de 128Km/h.



Como se puede observar en las gráficas de los resultados de las simulaciones, los modelos responden a cada exigencia de corriente del banco. Sin embargo, las configuraciones de las celdas para cada uno de los módulos nuevos (Samsung SDI de 68Ah y A123 modelo AMP20M1HD-A); presentan resistencias internas muy elevadas las cuales perjudican el rendimiento del banco al provocar una caída de voltaje muy brusca en el instante en que se aplica el pulso de corriente. Como es de esperarse, los modelos agotan su capacidad en forma ordenada, en todos los resultados de las simulaciones el banco que demora menos en descargarse es el banco conformado por las celdas Samsung que tiene una capacidad de 68Ah, seguido del banco acumulador del propio vehículo y finalmente el banco conformado por 432 celdas de la marca A123 (AMP20M1HD-A) que tiene una capacidad de 80Ah.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

6.1.1 Tecnologías de Acumuladores de Energía Eléctrica

En relación a las tecnologías de los acumuladores de energía eléctrica para aplicaciones en vehículos de tracción eléctrica, se puede concluir que los acumuladores que basan su química constructiva en el Ion Litio son los más idóneos para este tipo de aplicaciones. Gracias a la alta energía específica y densidad de energía, lo cual repercute en un menor peso y volumen del sistema de almacenamiento de energía respectivamente, el vehículo puede conseguir mayor autonomía y eficiencia.

6.1.2 Modelado del Banco Acumulador del Vehículo Eléctrico Kia Soul

El proceso experimental que se le aplicó al banco acumulador del VE Kia Soul, el proceso de parametrización y la elección del circuito equivalente más básico que se ajustó a las condiciones de trabajo del experimento, dieron resultados aceptables con un 2,85% de error máximo entre la simulación y los datos proporcionados por el INL [21] en el rango del *SoC* permitido por el vehículo.

6.1.3 Proceso Experimental y Proceso de Parametrización de las Celdas

Los procesos experimentales de interrupción de corriente para la obtención de los datos de los parámetros de los circuitos equivalentes revisado en la sección 3.5.1.2, resultaron ser óptimos, ya que en forma general los resultados de validación de todos los modelos muestran errores aceptables. Sin embargo, estos procesos experimentales, podrían ser aplicados para los procesos de carga y descarga con el fin de obtener los datos de parametrización para un ciclo completo del acumulador.

Por su parte el proceso de parametrización resultó ser bueno y preciso, ya que es muy importante la correcta identificación de los puntos de transición en el cual cambia de la tendencia vertical a no lineal el voltaje experimental del acumulador.

6.1.4 Modelos de Circuitos Equivalentes para las Celdas

En los modelados de las celdas caracterizadas se consideran dos ecuaciones que describen el comportamiento en circuito abierto para cada celda, estos es debido a la exactitud que se obtiene entre los resultados de las simulaciones y los datos experimentales, pero también es con el fin de tener una referencia del comportamiento de las celdas para aplicaciones que no consideran descargas profundas las cuales evitan una degradación abrupta del acumulador. Los modelos ajustados con la ecuación de circuito abierto que desprecia el estado de carga (SoC) del 0% para en la celda Samsung SDI, presentan los mejores resultados, mientras que para la celda A123 (AMP20M1HD-A) resulta mejor los resultados obtenidos de los modelos ajustados con la ecuación de voltaje de circuito abierto que considera el 0% del estado de carga (SoC).

En forma ascendente, el grado de precisión que se obtiene de los modelos que reproducen el comportamiento de las celdas tanto Samsung SDI de 68Ah como A123 (AMP20M1HD-A) es el siguiente: el modelo de Resistencia Interna, los modelos PNGV y S.C Modificado con resultados similares en todos los procesos de validación, el modelo de Thévenin y finalmente el modelo de Chen 2006. Este último modelo presenta resultados con mayor aproximación a los datos reales que se obtiene de los procesos experimentales, ya que es capaz de reproducir mejor el efecto de polarización Óhmica, por Activación y por Concentración que se da en el funcionamiento de un acumulador, superando de esta manera en precisión a los otros cuatro modelos propuestos.

En conclusión, se puede decir que el modelo que esté formado por un mayor número de redes RC que reproduzcan el comportamiento transitorio del acumulador, es el que más se acerca a reproducir el comportamiento real del acumulador. De tal forma que a mayor número de redes RC aumenta también la precisión y la complejidad del modelo.

6.1.5 Proceso de Caracterización de las Celdas como Bancos Acumuladores del VE Kia Soul

Al realizar la caracterización de las celdas Samsung SDI de 68Ah y A123 de 20Ah, como un banco acumulador para el VE Kia Soul, resulta que:

El banco propuesto con la celda Samsung SDI de 68Ah debe estar conformado por 96 celdas conectadas en serie que dan como resultado un voltaje nominal del banco de 355,2V pero con una capacidad de 68Ah lo que implica no solo decremento en la autonomía del vehículo, sino que también por la configuración de las celdas, la resistencia interna del banco es muy grande lo que provoca una fuerte polarización óhmica en el banco para aplicaciones de corrientes altas (altas velocidades del vehículo, mayores a los 32km/h), además se debe resaltar que la masa del banco conformada por las celdas Samsung SDI de 68Ah es el 17% mayor que el banco actual. Estos resultados permiten concluir que un banco conformado por las celdas Samsung SDI de

68Ah para los requerimientos del VE Kia Soul no es factible a pesar de que el volumen de este banco propuesto sea menor al banco actual.

El banco conformado por las celdas A123 modelo (AMP20M1HD-A) en una configuración 108S4P, incrementa en un 31% el valor de la masa del actual acumulador del vehículo, aunque de igual forma que en caso del banco conformado por las celdas Samsung SDI, el valor del volumen del banco se reduce. En este banco el efecto de polarización óhmica es mucho mayor que los tres bancos analizados, a pesar de tener una capacidad de 80Ah y un voltaje de 356,4V este banco no cumple con los requerimientos del VE Kia Soul debido al alto valor óhmico que presenta la configuración del banco.

6.1.6 Conclusiones Generales del Trabajo

Los amplios avances tecnológicos del Vehículo Eléctrico en los últimos años se ven en cierta media limitada debido a la no disponibilidad de un buen sistema de almacenamiento que le dote de una buena autonomía al vehículo, a pesar de que la tecnología del Ion Litio se esté imponiendo en las aplicaciones de la tracción eléctrica por sus prestaciones, aún no se logra tener un modelo que sea capaz de cubrir por completo las necesidades de movilidad que el vehículo tradicional viene haciendo. Sin embargo, se sabe que el parque automotor en las ciudades en donde el VE puede cubrir sin problema la movilidad es mucho mayor que otros sectores, es esencial tener modelos que describan el comportamiento de los acumuladores de energía eléctrica, ya que si estos presentan resultados precisos se puede tener una idea clara sobre el comportamiento de los acumuladores bajo diferentes condiciones de manejo.

En forma general se cumplen con los objetivos planteados para este Trabajo de Titulación, el error máximo que es aceptable en el modelado del Banco acumulador del VE Kia Soul, sirve como una buena referencia para tener en cuenta el comportamiento del banco. Por otra parte, los resultados de los modelados de las celdas son bastante aceptables lo que implica que tanto los procesos experimentales, así como de parametrización funcionan.

6.2 RECOMENDACIONES

Las tecnologías del Ion Litio para aplicaciones de tracción eléctrica presentan diversas formas de comportamiento. En este Trabajo se presentan modelados de dos tipos de celdas de Ion Litio "LFP y LMO & NMC", de capacidades de 20Ah y 68Ah respectivamente. Además, se modela un banco acumulador conformado por celdas de Polímero de Ion Litio que tiene una capacidad de 37,5Ah. Es muy recomendable tener actualizado la librería de cierto Software, para el caso específico de este Trabajo Simulink, con los diversos tipos de modelados que reproduzcan el



comportamiento de los acumuladores, lo que implica seguir realizando este tipo de modelados de los distintos acumuladores.

Los modelados de las celdas se realizaron teniendo en cuenta todo el rango de variación del estado de carga de ellas, por lo que es recomendable considerar un rango de variación del estado de carga que sea seguro, con el fin de evitar la degradación rápida de las celdas.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] INER. "Eficiencia Energética en el Transporte", (2014). [Online]. Available: http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/TRANSPORTE_DOSSIER.pdf.
- [2] Guayanlema V. "Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero en el sector transporte al 2012". Universidad Central del Ecuador, Quito, (2013).
- [3] INER. "Proyectos Emblemáticos", (2013). [Online]. Available: <http://www.energia.gob.ec/proyectos-emblematicos-2/>.
- [4] Moreno F. "Vehículos Eléctricos. Historia, Estado Actual y Retos Futuros". Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Málaga, España. (2016).
- [5] C. C. Chan. "The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles". IEEE Press. (2012).
- [6] Cuervo E. CURSO: "El vehículo eléctrico, su infraestructura y los retos de las empresas distribuidoras", cecacier. (2017).
- [7] Energía y Sociedad. "Las Claves del Sector Energético". [Online]. Available: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/4-1-por-que-el-vehiculo-electrico/>.
- [8] Vergara M. "Tecnología de Baterías", Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María. DSP ELO385.
- [9] Fundación de la Energía en la Comunidad de Madrid. Guía del vehículo eléctrico. (2009).
- [10] Iñigo G. "Sistemas De Almacenamiento Electroquímico", Ikerlan, Fundación para la Eficiencia Energética, Castellón, (2016).
- [11] Chediak M. "La batería matara a los combustibles fósiles", Bloomberg Techonology, (2018). [Online]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-08/the-battery-will-kill-fossil-fuels-it-s-only-a-matter-of-time>
- [12] Eco Inteligencia. "Pioneros en la Electromovilidad", General Motor. [Online]. Available: <http://www.ecointeligencia.com/2015/01/pioneros-electromovilidad-gm-ev1/>.
- [13] Sitiosolar.com. "Los coches eléctricos y las energías renovables", Reva i Cuatriciclo, [Online]. Available: <http://www.sitiosolar.com/los-coches-electricos-y-las-energias-renovables>.
- [14] FLOW GRID. "BATERÍAS DE FLUJO Zn-Br PARA SMART GRIDS". [Online]. Available: <http://www.flow-grid.com/es/Bateria-de-flujo-FAQ.php>
- [15] Tyler Gray. Mitthew Shirk. "2010 Toyota Prius VIN 0462 Hybrid Electric Vehicle Battery Test Results". The Idaho National Laboratory is a U.S. (2013).
- [16] Motor.es, "Toyota Prius 2016", (2016). [Online]. Available: <https://www.motor.es/noticias/toyota-prius-2016-tuning-201524753.html>
- [17] Moreno F. "Tesla Model 3", (2017), [Online]. Available: <https://es.motor1.com/news/150649/tesla-model3-primeras-entregas-produccion/>
- [18] Equipo Denki. "Fotos del Pack de Baterías del Tesla Model 3 y Detalles Técnicos que las Diferencia de las Demás", (2017), [Online]. Available: <https://denki.es/722/fotos-del-pack-de-baterias-del-tesla-model-3-y-detalles-tecnicos-que-las-diferencia-de-las-demas>
- [19] Andreotti J. "Entendiendo el tema del litio en Argentina", Consultores de Telecomunicaciones y Electricidad (CTE), (2012), [Online]. Available: http://ingenieroandreotti.blogspot.com/2012_11_23_archive.html
- [20] Idaho National Laboratory INL. "Advanced Vehicle Testing Activity. Battery Pack Laboratory Testing Results 2014 BMW i3 EV - VIN 5658". (2017)
- [21] Idaho National Laboratory INL. "Advanced Vehicle Testing Activity. Battery Pack Laboratory Testing Results. 2015 Kia Soul - VIN 1920". (2016)
- [22] M. Rosina. "Stationary Storage and Automotive Li-ion Battery Packs", Yole Development. (2016),



- [23] Soto Sepúlveda E. "Baterías: la siguiente revolución de la energía", (2017). [Online]. Available: <https://es.linkedin.com/pulse/bater%C3%ADas-la-siguiente-revoluci%C3%B3n-de-energ%C3%ADa-eduardo-soto-sep%C3%BAveda>
- [24] Castaño Solís S. "Modelado y caracterización funcional en régimen dinámico de sistemas electroquímicos de almacenamiento de energía: Aplicación a supercondensadores y baterías de iones de litio", Universidad Carlos III de Madrid, (2014).
- [25] García Plaza M. "Estudio y Modelado de la Respuesta Dinámica de Baterías Electroquímicas Destinadas a las Aplicaciones Estacionarias". Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, (2015).
- [26] Rodríguez Cea A. "Modelo Para la Batería de Ion de Litio de un Vehículo Eléctrico", Escuela Ingenierías Industriales. Valladolid, (2017).
- [27] Hongwen He, Rui Xiong, and Jinxin Fan, "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach", J. Energies, vol. 4, pp 582-598, ISSN 1996-1073, (March 2011).
- [28] Chen, M. y Rincon Mora G. "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance". Energy Conversion, IEEE Transaction on, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, (2006).
- [29] Morente Fernández C. "Análisis y Modelado del Comportamiento de Baterías pPara Vehículos Eléctricos". Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, (2015).
- [30] Ahmad RAHMOUN, Helmuth BIECHL. "Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams ", University of Applied Sciences Kempten.
- [31] Hioko. "Impedance Analyzer im7580 Hioko". [Online]. Available: https://www.hioki.com/en/products/detail/?product_key=6321
- [32] Hongwen He, Rui Xiong, and Jinxin Fan. "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach," J. Energies, vol. 4, pp 582-598, ISSN 1996-1073, (2011).
- [33] Murat Ceylan, Türev Sarıkurt, Abdulkadir Balıkçı, "A Novel Lithium-Ion-Polymer Battery Model for Hybrid/Electric Vehicles", Department of Electronics Engineering, Gebze Institute of Technology Kocaeli. Turkey, (2014).
- [34] AA Portable Power Corp. "Polymer Lithium Ion Battery PL-383562".
- [35] KIM, J., SHIN, J., CHUN, C., y CHO, B. H. "Stable configuration of a Li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing". Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 27, no.1, pp. 411-424, (2012).
- [36] Idaho National Laboratory INL. "Advanced Vehicle Testing, 2015 Kia Soul EV Baseline Vehicle Testing Results". (2016).
- [37] My Kia Soul EV.com. "Newer Soul EVs and battery pack upgrades", [Online]. Available: <http://www.mykiasoulev.com/forum/viewtopic.php?t=736&start=10>.
- [38] My Kia Soul EV.com. "Comparing layout of the Soul EV battery with other EVs", [Online]. Available: <http://www.mykiasoulev.com/forum/viewtopic.php?t=662>
- [39] Kosowski Steve, "Comparing Battery Chemistries", [Online]. My Kia Soul EV.com. Available: <http://www.mykiasoulev.com/forum/viewtopic.php?t=565>
- [40] Merchán Lima J. Estudio del Rendimiento Energético de un Vehículo Eléctrico en la Ciudad de Cuenca. Ecuador, (2018).
- [41] Bernhard Schweighofer, Klaus M. Raab, and Georg Brasseu. "Modeling of High Power Automotive Batteries by the Use of an Automated Test System", IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 52, NO. 4, (2003).
- [42] Iglesias, A. Lago, A. Nogueiras, C. Martínez-Peñalver, J. Marcos, C. Quintans, M.J. Moure, M.D. "Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda". Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Vigo. (2012).
- [43] ABU-SHARKH, S. y DOERFFEL, D. "Rapid test and non-linear model characterization of solid-state lithium-ion batteries", Journal of Power Sources, vol. 130, no.1, pp. 266–274, (2004).



- [44] Ari Hentunen, Member, IEEE, Teemu Lehmuspelto, Member, IEEE, and Jussi Suomela. Time-Domain "Parameter Extraction Method for Thévenin-Equivalent Circuit Battery Models". IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION.
- [45] Eduardo Espinoza Ramos, Análisis Matemático II Para estudiantes de Ciencia e Ingeniería Tercera Edición, marzo 2002.
- [46] Kaiyuan Li. King Jet Tseng. "An Equivalent Circuit Model for State of Energy Estimation of Lithium-ion Battery". School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University. Singapore.
- [47] Charles K. Alexander, Cleveland State University. Matthew N. O. Sadiku, Prairie View A&M University. "Fundamentos de Circuitos eléctrico". Tercera edición.